



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN TRANSIENT STABILITY MENGGUNAKAN CRITICAL TRAJECTORY YANG BERBASIS HILANGNYA SINKRONISASI

Yayang Sophiyan
NRP 2213 105 049

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST.,MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

**TRANSIENT STABILITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER
FLOW USING CRITICAL TRAJECTORY BASED ON LOSING
SYNCHRONIZM**

Yayang Sophiyan
NRP 2213 105 049

Advisor
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST.,MT.

Department of Electrical Engineering
Faculty of Industrial Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN
TRANSIENT STABILITY MENGGUNAKAN
CRITICAL TRAJECTORY YANG BERBASIS
HILANGNYA SINKRONISASI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



**OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN TRANSIENT
STABILITY MENGGUNAKAN CRITICAL TRAJECTORY
BERDASARKAN HILANGNYA SNKRONISASI.**

Nama : Yayang Sophiyan
Pembimbing I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Pembimbing II : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST.,MT.

ABSTRAK

Dalam melakukan optimasi aliran daya suatu sistem tenaga listrik perlu memperhatikan batasan – batasan yang harus dipenuhi agar sistem tersebut memiliki kehandalan dan stabilitas yang baik. Kehandalan dan stabilitas yang dimaksud tidak hanya saat sistem beroperasi secara normal tetapi juga saat terjadi gangguan. Salah satu yang menjadi batasannya adalah kestabilan transien. Analisa kestabilan transien dilakukan dengan mengamati perubahan sudut rotor terhadap waktu saat terjadi gangguan sampai gangguan tersebut dihilangkan. Dalam hal ini kestabilan suatu sistem sangat dipengaruhi dengan waktu pemutusan CB. Suatu sistem memiliki waktu pemutus /critical clearing time (CCT) dimana saat terjadi gangguan dan diputus sebelum CCT, maka sistem dapat kembali pada kondisi *steady state* dan apabila gangguan diputus lebih dari CCT, sistem tidak dapat kembali pada kondisi stabilnya. Parameter inilah yang digunakan sebagai batasan yang digunakan dalam melakukan optimasi aliran daya. Dalam tugas akhir ini nilai CCT yang digunakan sebagai batasan optimasi aliran daya dihitung menggunakan metode critical trajectory berdasarkan hilangnya sinkronisasi. Sistem yang diuji, yaitu sistem 6 generator 30 bus dan didapatkan nilai CCT yang terkecil dari beberapa titik gangguan adalah 0.51 detik. Berdasarkan CCT yang didapat sistem dapat dikatakan stabil karena memiliki waktu pemutusan CB 0.5 detik.

Kata Kunci : Optimasi Aliran Daya ,Transient Stability, *Critical Clearing Time (CCT)*, *Critical Trajectory*

Halaman ini sengaja dikosongkan

TRANSIENT STABILITY CONSTRAINED OPTIMUM POWER FLOW USING CRITICAL TRAJECTORY BASED ON LOSS OF SYNCHRONISM

Name : Yayang Sophiyan
Advisor I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Advisor II : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST.,MT.

ABSTRACT

In the optimization of power flow electric power system need to pay attention to limits - limits that must be met in order for the system has good reliability and stability. Reliability and stability is not only when the system is operating normally but also when an interruption occurs. One of the limitations is the transient stability. Transient stability analysis is done by observing the change in the rotor angle with respect to time when an interruption occurs until the interference is eliminated. In this case the stability of a system is highly influenced by the time of termination CB. A system has a circuit breaker / critical clearing time (CCT) in which the event of disruption and terminated before the CCT, then the system can return to steady state conditions and if interference is disconnected more than CCT, the system can not go back to the stable condition. The parameter is used as constraints used in the optimization of power flow. In this final CCT values are used as power flow optimization limit is calculated using the critical trajectory method is based on the loss of synchronization. The system being tested, namely 6 generator system bus 30 and obtained CCT smallest value from some point disorder is 0:51 seconds. Based on the obtained CCT system can be said to be stable because it has a termination time CB 0.5 seconds.

Keywords : Transient Stability Analysist, *Critical Clearing Time (CCT), Critical Trajectory*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya yang berlimpah, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: ***Optimal Power Flow dengan Batasan Transient Stability menggunakan Critical Trajectory Berbasis Hilangnya Sinkronisasi*** tepat pada waktunya. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT atas segala rahmat dan nikmat yang tidak terhingga yang diberikan kepada penulis, sehingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Segenap keluarga, terutama pada kedua orang tua saya yang selalu memberikan dukungan moril dan materil, sehingga penulis dapat menyelesaikan masa studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember ini.
3. Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi ST, M.Eng. dan Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT. sebagai Dosen Pembimbing yang telah membimbing, memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman-teman asisten seperjuangan : Azhar, Arya, Amarendra, dan rekan – rekan asisten lab LIPIST B204 yang selalu memberi bantuan berupa dukungan dan sharing ilmu sehingga penulis dapat menambah wawasan terkait tugas akhir.
5. Risca Maya Probo Andini yang selalu memberi semangat kepada Penulis untuk menyelesaikan studi.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Penulis juga memohon maaf jika ada

kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Metodologi	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
1.6. Relevansi	5
 BAB 2 OPTIMAL POWER FLOW DAN KESTABILAN TRANSIEN	
2.1 Studi Aliran Daya.....	5
2.1.1 Persamaan Aliran Daya.....	6
2.1.2 Metode Newton Rhapson.....	8
2.2 <i>Optimal Power Flow</i>	13
2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	15
2.4 <i>Transient Stability</i>	17
2.5 Waktu Pemutus Critis (<i>Critical Clearing Time</i>).....	19
2.6 Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>)	19
 BAB 3 OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN KESTABILAN TRANSIEN	
3.1 <i>Optimal Power Flow</i> Menggunakan MATPOWER.....	21
3.2 Reduksi Matrik	22
3.3 Pemodelan Sistem	24

3.3.1	Persamaan Ayunan (<i>Swing Equation</i>)	24
3.3.2	Multi Mesin Tanpa Bus Infinite	26
3.3.3	Pemodelan Generator	27
3.4	Perumusan Masalah	28
3.4.1	Metode Runge-kutta Orde 4	29
3.4.2	Modifikasi Persamaan Trapezoidal	30
3.5	Kondisi Hilangnya Sinkronisasi	31
3.6	<i>Boundary Condition</i>	32
3.7	Minimisasi Masalah.....	32
3.8	Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i>	34
3.9	Batasan Kestabilan Transien sengan Sensitive Trajectory.....	37
 BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS		
4.1.	Analisa Optimasi Aliran Daya dengan Batasan Stabilitas	
	Transien pada sistem IEEE 6 Generator 30 Bus.....	39
4.1.1	Parameter OPF untuk Sistem 6 Generator 30 bus	42
4.1.2	Kestabilan Transien pada sistem 6 generator 30 bus menggunakan Critical Trajectory.....	44
4.1.3	Simulasi dan Analisa Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus	45
 BAB 5 PENUTUP		
5.1.	Kesimpulan	59
5.2.	Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA		61
BIODATA PENULIS		63

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Data saluran transmisi sistem IEEE 6 generator-30 bus.	40
Tabel 4.2. Data bus sistem IEEE 6 generator-30 bus.....	41
Tabel 4.3. Data Generator Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus	42
Tabel 4.4. Parameter Pembangkitan Generator hasil OPF untuk Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus.....	43
Tabel 4.5. Nilai Tegangan Tiap Bus hasil OPF pada sistem IEEE 6 Generator 30 Bus.....	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Skema Sistem Tenaga Listrik	5
2.2. Jaringan Tenaga Listrik Secara Sederhana	7
2.3. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....	16
2.4. Skematik diagram mesin sinkron.....	17
2.5. Representasi suatu rotor generator yang membandingkan arah perputaran serta momen putar mekanis dan elektrik	18
2.6. Respon sudut rotor terhadap gangguan transien	19
2.7. Lintasan dalam setiap tahap pada sistem tenaga listrik Satu generator terhubung ke bus infinite dengan peredam.....	20
3.1. Pemodelan Generator	28
3.2. Konsep dari modifikasi metode trapezoidal	31
3.3. Susunan matriks Jacobian untuk perhitungan <i>CCT</i> Berdasarkan hilangnya sinkronisasi	36
4.1. <i>Single line diagram</i> sistem IEEE 6 generator 30-bus	39
4.2. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.	45
4.3. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A	46
4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.....	46
4.5. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.....	47
4.6. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.	47
4.7. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B	48
4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B	48
4.9. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.....	49

4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C	49
4.11. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C	50
4.12. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C	50
4.13. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C	51
4.14. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D	51
4.15. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D	52
4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D	52
4.17. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D	53
4.18. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E	53
4.19. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E	54
4.20. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E	54
4.21. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E	55
4.22. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F	55
4.23. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F	56

4.24. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F	56
4.25. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F	57
4.26. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.	57
4.27. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada Sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G	58
4.28. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator-30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G	58
4.29. Grafik sudut rotor relative terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.....	59

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kriteria dari suatu sistem tenaga listrik selain handal juga mempertimbangkan tingkat ekonomis, sehingga tidak hanya handal, sistem tenaga listrik juga diharapkan memiliki tingkat ekonomis yang baik tanpa mengurangi tingkat kehandalan sistem tersebut. Hal yang paling mendasar dalam sistem tenaga listrik adalah pembangkitan energi listrik. Seperti yang kita ketahui bahwa energi listrik dibangkitkan dengan merubah energi potensial suatu material menjadi energi kinetik lalu energi kinetik tersebut dirubah menjadi energi listrik dengan menggunakan alat yang disebut generator. Berdasarkan material yang digunakan dalam pembangkitan energi listrik unit pembangkit listrik dibagi menjadi dua, yaitu unit pembangkit thermal dan unit pembangkit non thermal. Unit pembangkit yang paling banyak digunakan adalah unit pembangkit thermal karena selain daya yang dibangkitkan besar, bahan baku yang digunakan terdapat bebas di alam. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda tergantung dari bahan baku yang digunakan serta energi panas yang dihasilkan berdasarkan energi listrik yang akan dibangkitkan. Dengan perbedaan karakteristik tersebut perlu dilakukan suatu perhitungan untuk mengetahui konfigurasi pembangkitan energi listrik di setiap unit pembangkit untuk mendapatkan hasil yang ekonomis. Ekonomis yang dimaksudkan adalah biaya dari pembangkitan energi listrik dari setiap unit pembangkit. Secara umum hal ini dapat dikatakan sebagai Optimasi Power Flow (OPF). Dalam melakukan optimasi diperlukan suatu fungsi objektif yang digunakan sebagai acuan perhitungan. Dalam hal ini fungsi objektif yang akan digunakan adalah meminimalisasi total biaya pembangkitan dari unit pembangkit.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa hal yang paling utama dalam sistem tenaga listrik adalah kehandalan sistem tersebut. Yang dimaksud handal adalah suatu sistem mampu bertahan dari gangguan yang terjadi agar tetap pada kondisi stabilnya. Kondisi stabil dari suatu sistem dapat dilihat dari beberapa variable, yaitu tegangan, frekuensi dan sudut rotor.

Kondisi stabil dari suatu sistem tenaga listrik disebut kestabilan sistem tenaga listrik. Berdasarkan variable yang telah disebutkan sebelumnya, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga, yaitu kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor. Sehingga dalam melakukan optimasi perlu mempertimbangkan kestabilan tersebut. Hal inilah yang dikatakan sebagai batasan dalam melakukan optimasi. Yang akan dibahas pada buku ini adalah kestabilan sudut rotor yang juga disebut sebagai kestabilan transien.

1.2 Perumusan Masalah

Pada tugas akhir ini yang menjadi permasalahan adalah mencari biaya pembangkitan yang minimum pada multimesin dengan mempertimbangkan batasan kestabilan transien dengan menggunakan metode lintasan kritis (*Critical Trajectory*) pada sistem 6 generator 30-bus.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah menemukan titik operasi setiap generator dengan mempertimbangkan batasan kestabilan transien berdasarkan waktu pemutusan kritis/*Critical Clearing Time (CCT)* menggunakan metode lintasan kritis (*Critical Trajectory*).

1.4 Metodologi

Metode dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- 1) Studi Literatur
Studi literatur berisi tentang serangkaian kegiatan penulis dalam pencarian dan pengkajian terhadap sumber – sumber yang relevan dan terpercaya dari jurnal ilmiah (paper), buku-buku dan artikel – artikel di internet yang dapat menunjang dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
- 2) Pemodelan sistem dan Simulasi
Berdasarkan data yang diperoleh dari studi literatur, data tersebut dimodelkan dalam bentuk listing program pada MATLAB yang kemudian digunakan metode *critical trajectory* sebagai batasan dari *optimum power flow*

sehingga dapat ditentukan pembebanan dari tiap generator yang menghasilkan biaya pembangkitan yang paling minimum dan mendapatkan nilai *critical clearing time* (CCT). *Flowchart* pemodelan sistem dan simulasi digambarkan pada Gambar 4.

- 3) Analisa Data
Berdasarkan pemodelan dan hasil simulasi sehingga nilai CCT dari setiap titik gangguan dan pembebanan dari tiap generator dapat ditemukan. Dari hasil yang didapat dilakukan analisa terhadap total biaya dan kestabilan sistem.
- 4) Penulisan Buku Tugas Akhir
Penulisan buku tugas akhir didapatkan setelah hampir semua keseluruhan proses penelitian selesai. Buku tugas akhir nantinya dibuat berdasar data nyata dan real serta berdasarkan fakta ilmiah yang dapat dipertanggung jawabkan kebenarannya.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing – masing bab akan terurai sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas mengenai penjelasan latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi dan sistematika penulisan.

BAB II : OPTIMAL POWER FLOW DAN KESTABILAN TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK

Pada bab ini menjelaskan dasar teori dalam melakukan suatu optimasi aliran daya (*Optimal Power Flow*) dan kestabilan transien pada sistem tenaga listrik secara umum disertai dengan penjelasan hubungan antara keduanya untuk mendapatkan suatu sistem dengan hasil optimasi yang baik.

BAB III : OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN KESTABILAN TRANSIEN

Pada bab ini menjelaskan hubungan antara optimasi aliran daya terhadap kestabilan transien sistem. Pemodelan sistem dan penurunan – penurunan rumus untuk mencapai hasil yang diinginkan. Penggunaan metode lintasan kritis untuk menyelesaikan permasalahan kestabilan transien untuk

mendapatkan nilai CCT pada sistem berdasarkan letak gangguan yang terjadi.

BAB IV : SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini menjelaskan mengenai hasil simulasi dari pemodelan sistem yang telah dilakukan untuk mendapatkan hasil optimasi berdasarkan total biaya pembangkitan yang paling murah dengan mempertimbangkan waktu pemutusan kritis (CCT) saat terjadi gangguan pada sistem.

BAB V : PENUTUP

Pada bab ini berisi kesimpulan dari hasil simulasi dan data – data yang telah didapat berdasarkan permasalahan yang ada. Selain itu juga terdapat saran – saran sebagai pengembangan dari tugas akhir ini.

1.6 Relevansi

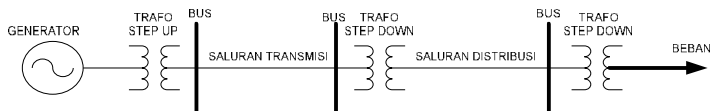
Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan menjadi salah satu alternative dalam melakukan optimasi. Optimasi yang dilakukan dengan batasan kestabilan transien dengan cara membandingkan hasil koordinasi CB dengan nilai CCT. Koordinasi CB dilakukan hanya berdasarkan hirarki pewaktuan pemutusan CB. Dengan nilai CCT yang didapat berdasarkan metode lintasan kritis (*critical trajectory*) akan dibandingkan dengan koordinasi pewaktuan pemutusan CB tersebut. Berdasarkan hal tersebut dalam menentukan pembebanan pada tiap generator harus memenuhi persyaratan $t_{CB} \leq CCT$. T_{CB} yang dimaksudkan adalah t_{CB} yang terdekat dengan generator.

BAB II

OPTIMAL POWER FLOW DAN KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Studi Aliran Daya

Pada umumnya sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang bertujuan menyalurkan daya yang dibangkitkan oleh generator kepada konsumen. Tahapan – tahapan yang dilalui agar energy listrik sampai pada konsumen adalah yang paling awal pembangkitan energy listrik. Tahapan ini terjadi pada suatu unit pembangkit dimana didalamnya terdapat turbin sebagai pengubah energy potensial menjadi energy kinetic atau energy gerak dan generator yang berfungsi mengubah energy kinetic yang dihasilkan turbin menjadi energy listrik. Pada dasarnya yang dibangkitkan oleh generator adalah tegangan listrik. Karena adanya beban yang menimbulkan arus listrik maka dengan besaran tegangan dan arus listrik tersebut terbentuklah suatu daya listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh generator dinaikkan pada level tegangan tertentu dan disalurkan melalui saluran transmisi. Pada saluran transmisi ini level tegangan dimulai dari 150kV. Pada kondisi tertentu dimana beban/konsumen letaknya sangat jauh dari pusat pembangkit level tegangan yang digunakan pada saluran transmisi adalah 500 kV. Hal ini bertujuan untuk mengurangi rugi – rugi daya yang terjadi akibat impedansi saluran yang besar karena panjang saluran yang sangat panjang. Dari saluran transmisi energy listrik masuk pada tahap saluran distribusi. Pada tahap ini level tegangan diturunkan menjadi 20 kV dan disalurkan ke beban – beban. Untuk beban perumahan dari tegangan 20 kV level tegangan diturunkan menjadi 380 V. Proses penyaluran daya dari generator sampai ke beban inilah yang dikenal sebagai aliran daya listrik (*Power Flow*). Untuk lebih jelas dapat dilihat gambar 3.1 berikut



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik.

Studi aliran daya dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai parameter – parameter suatu sistem tenaga listrik. Dimana parameter – parameter tersebut adalah daya aktif, daya reaktif, tegangan dan sudut tegangan dari tiap – tiap bus pada sistem tersebut. Berdasarkan referensi

[7] studi aliran daya, bus – bus yang ada pada sistem diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Slack bus atau swing bus
2. Generator bus atau voltage controlled bus
3. Load bus atau bus beban

Pada tiap – tiap bus memiliki 4 besaran namun dari 4 besaran tersebut hanya 2 besaran yang diketahui. Pada slack bus diketahui magnitude tegangan $|V|$ dan sudut fasanya $|\theta|$, pada bus generator diketahui daya aktif P dan dan magnitude tegangan $|V|$, pada bus beban diketahui daya aktif P dan daya reaktif Q .

2.1.1 Persamaan aliran daya

Persamaan aliran daya dari suatu jaringan dapat diformulasikan dengan berbagai cara. Biasanya untuk menyelesaikan permasalahan pada analisis sistem tenaga digunakan metode node voltage. Perumusan dari persamaan jaringan pada masukan simpul/bus merupakan hasil dari persamaan aljabar simultan linear yang kompleks dalam hal ini adalah arus simpul. Ketika arus simpul telah ditentukan persamaan persamaan linear dapat diselesaikan untuk tegangan simpul. Namun, pada sistem tenaga daya lebih dikenal daripada arus. Dengan demikian persamaan yang dihasilkan dalam hal ini berupa daya yang kita ketahui sebagai persamaan aliran daya menjadi non linear dan harus diselesaikan dengan teknik iterasi. Berdasarkan refrensi [7] persamaan arus pada suatu simpul/bus dinyatakan dalam rumus sebagai berikut,

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.1)$$

Berdasarkan rumus tersebut jika diaplikasikan pada suatu jaringan sistem tenaga listrik dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dimana,

n = jumlah simpul

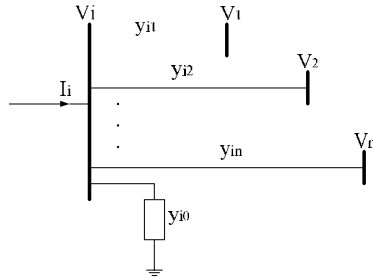
I_i = arus yang mengalir pada simpul i

Y_{ij} = admitansi bersama antara simpul i dan j

Y_{ii} = admitansi sendiri pada simpul i

V_i = tegangan fasor pada simpul i

Untuk dapat memahami persamaan aliran daya pada tiap simpul dapat dilihat dari gambar jaringan berikut



Gambar 2.2 Jaringan Tenaga Listrik Secara Sederhana

Pada jaringan tersebut dapat diterapkan hukum kirchoff arus yang menghasilkan persamaan

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2.3)$$

Secara sederhana dapat dinyatakan,

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.4)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah,

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.5)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.6)$$

zDengan mensubstitusikan persemiaan (2.4) ke persamaan (2.6) , didapat perumusan

$$\frac{P_i - j Q}{V_i^*} = V i \sum_{j=0}^n i y - \sum_{j=1}^n x_j V_j \quad j \neq 1 \quad (2.7)$$

2.1.2 Metode Newton-Rhapson

Berdasarkan refrensi [7] metode newton rhapsion merupakan metode yang menggunakan teknik iterasi untuk menyelesaikan permasalahan persamaan non-linear. Ekspansi deret taylor pada fungsi dengan dua atau lebih variable adalah dasar metode ini menyelesaikan persamaan tersebut. Misalkan suatu fungsi yang berjumlah n persamaan dengan n tidak diketahui seperti berikut :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_2 \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_n \end{aligned} \quad (2.8)$$

Jika iterasi dimulai dengan kondisi awal $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ dengn n tidak diketahui dan jika $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ adalah nilai koreksi yang dibutuhkan untuk mendapatkan penyelesaian, sehingga persamaan tersebut menjadi

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_2 \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_n \end{aligned} \quad (2.9)$$

Tiap persamaan diatas dapat diekspansi menggunakan teorema taylor. Bentuk ekspansi persamaa diatas untuk iterasi pertama adalah

$$\begin{aligned} &f_i(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) \\ &f_i(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1}\right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2}\right)_0 \Delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)_0 \Delta x_n + \\ &\dots = b_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

Untuk ekspansi dari deret taylor diatas untuk nilai dengan x_{n+1} yang mendekati dengan nilai awal yang telah ditentukan dapat diabaikan dan itu merupakan penyelesaian dari persamaan diatas. Hasil dari persamaan diatas jika dijadikan dalam bentuk matriks dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ b_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Atau

$$\Delta f = J \Delta x \quad (2.12)$$

J merupakan Jacobian dari turunan parsial fungsi f_1, f_2, \dots, f_n terhadap x_1, x_2, \dots, x_n pada kondisi awal. Sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta f_1^{(0)} \\ \Delta f_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta f_n^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Merupakan persamaan nilai koreksi. Nilai akhir x_1, x_2, \dots, x_n diperoleh saat nilai $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ lebih kecil dari toleransi yang diberikan. Jika melebihi toleransi yang diberikan, maka estimasi baru dari x_1, x_2, \dots, x_n dihitung pada iterasi selanjutnya sampai didapat nilai $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ lebih kecil dari toleransi.

Penerapan metode Newton-Rhapson pada persamaan aliran daya digunakan pada rumus (2.7), dimana untuk daya aktif dan daya reaktif dihitung secara terpisah. Sehingga persamaan untuk aliran daya dapat dituliskan sebagai berikut,

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_j + \delta_j + \delta_i)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_j + \delta_j + \delta_i)$$
(2.14)

Dimana,

- P = Daya aktif generator
- Q = Daya reaktif generator
- V = Magnitud tegangan Bus/simpul
- Y_{ij} = Impedansi saluran
- δ_i = Sudut tegangan
- θ_{ij} = Sudut impedansi

Persamaan di atas merupakan persamaan aljabar non-linear dari variable bebas. Besaran tegangan dinyatakan dalam satuan per unit (pu) dan sudut phasa dinyatakan dalam satuan radian. Persamaan diatas dapat digunakan pada bus beban dan bus generator. Dengan mengembangkan persamaan tersebut pada deret taylor tentang estimasi awal dan mengabaikan semua persamaan dengan orde tinggi dihasilkan persamaan berikut dalam matriks

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \vdots & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \vdots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \vdots & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ & & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \vdots & |V_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \dots \\ \Delta |V_2| \\ |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \\ |V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \dots \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dalam hal ini bus 1 diumpamakan sebagai slack bus. Matriks Jacobian memberikan perbandingan yang linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dengan perubahan kecil dalam daya aktif $\Delta P_i^{(k)}$ dan daya reaktif $\Delta Q_i^{(k)}$. Persamaan (2.15) dapat dinyatakan dalam bentuk singkat seperti berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

J_1, J_2, J_3, J_4 , adalah elemen-elemen matriks Jacobian.

Banyaknya elemen matriks Jacobian dari persamaan (2.15) ditentukan dengan $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$ dengan n adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya bus generator pada sistem. J_1 diperoleh dari $(n - 1) \times (n - 1)$, J_2 diperoleh dari $(n - 1) \times (n - 1 - m)$, J_3 diperoleh dari $(n - 1 - m) \times (n - 1)$ dan J_4 diperoleh dari $(n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$.

Elemen untuk J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.18)$$

Elemen untuk J_2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_i| \cos \theta_i + \sum_{j \neq 1} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.20)$$

Elemen untuk J_3

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.22)$$

Elemen untuk \mathbf{J}_4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| \sum_{j \neq 1} |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.24)$$

Harga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah beda antara nilai yang dimasukkan dengan nilai yang dihitung, yang disebut sebagai *power residual*. Dan dituliskan menjadi persamaan,

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{\text{sch}} - P_i^{(k)} \quad (2.25)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{\text{sch}} - Q_i^{(k)} \quad (2.26)$$

Perhitungan tegangan bus dan sudut fasa yang baru adalah

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.27)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.28)$$

Proses iterasi akan berhenti jika sudah terpenuhi

$$|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (2.29)$$

ε = toleransi

2.2 Optimal Power Flow

Optimal power flow (OPF) berdasarkan referensi [6] merupakan gabungan dari perhitungan economic dispatch (ED) dengan perhitungan aliran daya, jadi permasalahan ED dan aliran daya diselesaikan secara simultan. Total rugi –rugi daya pada sistem tenaga merupakan bagian dari perhitungan aliran daya dan direfleksikan terhadap pembebanan pada bus referensi. Karena tidak dibutuhkan perhitungan rugi – rugi yang spesifik dan rugi – rugi daya juga merupakan bagian dari aliran daya, maka ED lebih dibatasi oleh kemampuan penyaluran daya pada suatu saluran transmisi dalam MW atau MVA atau transformator atau batas tegangan yang diizinkan pada tiap bus. Hasilnya berupa penyaluran daya yang dibangkitkan generator dan direpresentasikan dengan total biaya pembangkitan minimum dalam R/h atau \$/h serta menyelesaikan aliran daya pada kondisi optimum tersebut. Berdasarkan hal tersebut dalam menyelesaikan permasalahan OPF ditentukan dengan tujuan yang akan dicapai. Hal ini biasa disebut dengan fungsi objektif. Fungsi objektif dapat berupa minimisasi total biaya pembangkitan. Sehingga dalam melakukan perhitungan optimasi aliran daya harus menyelesaikan permasalahan – permasalahan kompleks sebagai berikut :

- Fungsi objektif = total biaya pembangkitan
- Batasan pertidaksamaan generator (inequality constraints)
- Pada tiap bus :
 - Besar daya pada tiap bus. Hal ini dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan aliran daya matriks Y bus pada tiap bus.
 - Magnitude dan sudut fasa tegangan pada tiap bus.

Untuk meminimisasi total biaya pembangkitan dapat dutilaskan dengan rumus

$$\min \sum_{i=1}^{N_{gen}} F_i (P_{gen}) \quad (2.30)$$

Dimana,

F_i = Fungsi biaya pembangkitan
 i = Indeks dari generator
 N_{gen} = Jumlah generator

Selain mempunyai fungsi objektif yang harus dicapai dalam menyelesaikan optimasi aliran daya terdapat batasan – batasan yang harus terpenuhi. Batasan – batasan tersebut diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *equality constraints* dan *inequality constraints*. Pada generator juga memiliki *inequality constraints* sebagai berikut,

$$P_{g \ e \ n}^{m \ i} \leq P_{g \ e \ n} \leq P_{g \ e \ n}^{m \ a \ x} \quad u \ n \ t \ u \ k \neq 1 \dots N_{g \ e \ n} \quad (2.31)$$

$$Q_{g \ e \ n}^{m \ i} \leq Q_{g \ e \ n} \leq Q_{g \ e \ n}^{m \ a \ x} \quad u \ n \ t \ u \ k \neq 1 \dots N_{g \ e \ n}$$

Dalam menyelesaikan aliran daya tersebut dapat dikatakan bahwa output dari generator adalah hasil penjumlahan dari daya beban dengan rugi – rugi daya. Dalam penyelesaiannya tidak diperlukan perhitungan secara langsung dari rugi – rugi daya atau incremental losses generator. Magnitude dan sudut phasa tegangan pada bus referensi atau swing bus telah ditentukan.

Berdasarkan referensi [6] solusi dari OPF dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$\min f \left(\underline{g_{e \ n} \underline{u}} \right) \quad (2.32)$$

Dengan batasan,

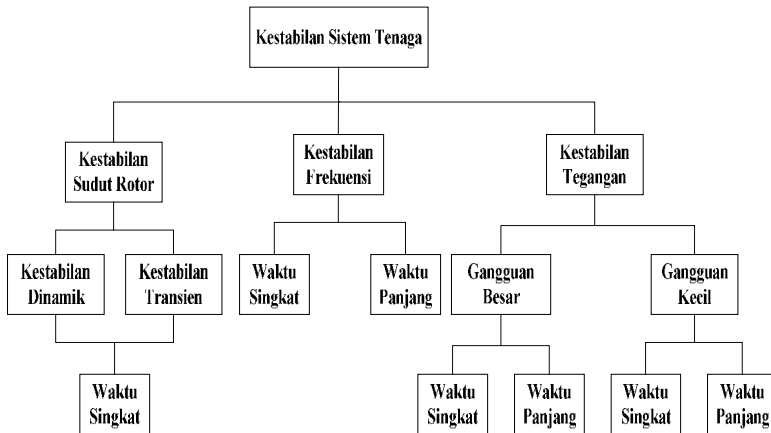
$$\begin{aligned} w \left(\underline{g_{e \ n} \underline{u}} \right) &= 0 \\ g \left(\underline{g_{e \ n} \underline{u}} \right) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dimana vector dari parameter \underline{u} terdapat parameter fungsi biaya generator, batasan daya aktif dan daya reaktif generator, dan parameter – parameter yang telah ditentukan untuk sistem transmisi. Parameter ini juga termasuk matriks admitansi, tegangan pada bus generator yang akan diatur, magnitude dan sudut phasa bus referensi. Persamaan $w \left(\underline{g_{e \ n} \underline{u}} \right) = 0$ adalah equality constraints $2N_{bus}$ yang merepresentasikan aliran daya pada persamaan matriks admitansi dan $g \left(\underline{g_{e \ n} \underline{u}} \right) \leq 0$ adalah inequality constraints yang merepresentasikan

setiap batasan daya aktif dan daya reaktif dari generator. Kelebihan dari rumus ini adalah memiliki akurasi yang tinggi dalam perhitungan rugi – rugi di dalam OPF.

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk dapat kembali beroperasi pada keadaan diluar kesetimbangan normalnya untuk mendapatkan kembali keadaan kesetimbangan yang diizinkan setelah terjadi gangguan. Pada sistem tenaga listrik gangguan dibedakan menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil merupakan gangguan yang disebabkan perubahan pembebanan yang terjadi pada sistem. Berdasarkan prinsip power balance diharapkan generator dapat mengikuti perubahan beban yang terjadi pada sistem agar sistem tetap stabil. Pada kasus ini disebut dengan kestabilan dinamik. Gangguan besar merupakan gangguan yang disebabkan karena adanya hubung singkat pada sistem. Gangguan hubung singkat dapat berupa hubung singkat phase to phase atau phase to ground. Dengan adanya gangguan tersebut menyebabkan terjadinya perubahan kondisi pada generator, tegangan pada tiap bus dan frekuensi sistem. Perubahan yang terjadi pada generator adalah pada torsi generator. Dengan adanya gangguan hubung singkat menyebabkan arus pada sistem menjadi sangat besar sehingga generator menanggung daya yang besar dan menyebabkan perlambatan pada rotor generator. Dengan kecepatan medan putar pada generator yang tetap dan terjadi penurunan kecepatan pada rotor yang disebabkan semakin besarnya torsi beban, maka generator kehilangan kondisi sinkronnya yang menyebabkan sistem tidak stabil. Untuk sistem dengan multi mesin keadaan tidak stabil dapat terjadi meskipun generator belum mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi. Oleh karena itu agar mudah untuk memahami dan menganalisa kestabilan sistem tenaga listrik perlu diklasifikasikan berdasarkan perubahan – perubahan tersebut. Berdasarkan referensi [7] kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan sebagai berikut



Gambar 2.3 Klasifikasi kestabilan Sistem Tenaga

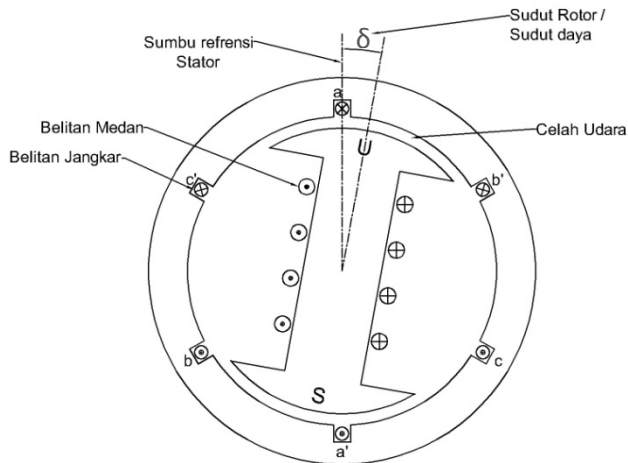
Berdasarkan gambar diatas inti dari kestabilan sistem tenaga dibedakan menjadi tiga, yaitu :

- **Kestabilan sudut rotor**
Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron yang terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya. Dalam hal ini generator harus mampu mempertahankan keseimbangan torsi mekanis dan torsi elektris. Ketidak setabilan torsi mekasnis dan torsi elektris dapat mengakibatkan perubahan sudut ayunan generator sehingga generator dapat kehilangan sinkronisasinya terhadap generator lain.
- **Kestabilan frekuensi**
Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan frekuensinya tetap stabil. Pada umumnya frekuensi sistem yang ada digunakan 50 Hz atau 60 Hz. Yang dapat mempengaruhi perubahan frekuensi adalah perubahan pembebanan yang terjadi pada sistem sehingga untuk persamaan power balance tidak terpenuhi. Dalam hal ini generator harus dapat mempertahankan frekuensi kerja sistem dengan kendali governour.
- **Kestabilan Tegangan**
Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga untuk dapat menjaga tegangan pada tiap bus berada pada level tegangan yang diizinkan saat sistem berada diluar kondisi normal akibat

adanya gangguan pada sistem. Ketidakstabilan tegangan sistem dapat terjadi akibat dari gangguan, penambahan atau pelepasan beban pada sistem, dan perubahan sistem akibat tidak terkontrolnya drop tegangan pada sistem. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan karena sistem tidak mampu memenuhi kebutuhan daya reaktif dari sistem tersebut.

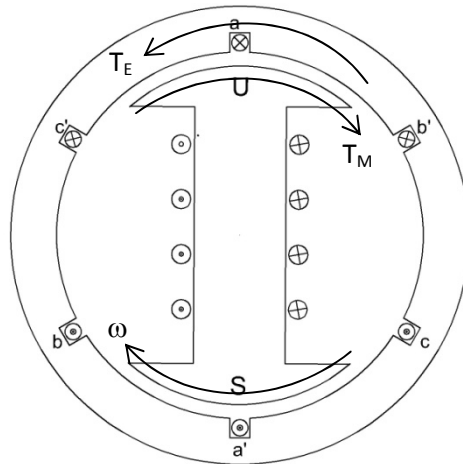
2.4 Transient Stability

Transient stability/kestabilan transien merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya karena adanya gangguan transien. Respon sistem yang dihasilkan melibatkan sudut generator yang dipengaruhi oleh hubungan non-linear dari sudut daya. Sudut daya merupakan hasil representasi dari perbedaan sudut rotor terhadap stator berdasarkan referensi yang telah ditentukan.



Gambar 2.4 Skematik diagram mesin sinkron

Penagaturan gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen inersia rotor dan percepatan sudut. Berdasarkan referensi [11] ilustrasi dari torsi mekanis, torsi elektrik dan kecepatan putar rotor dapat dilihat pada Gambar 2.5,

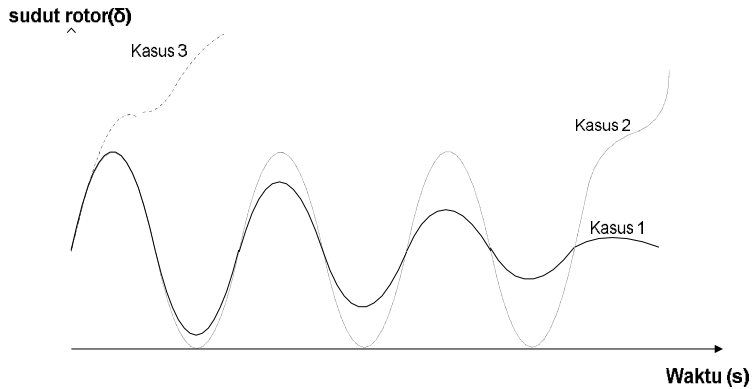


Gambar 2.5 Representasi Suatu Rotor Generator yang Membandingkan Arah Perputaran Serta Momen Putar Mekanis dan Elektris.

T_m merupakan torsi mekanik dari rotor generator yang sifatnya cenderung mempercepat putaran rotor. Pada kondisi stabil (*steady state*), besar torsi mekanik (T_m) sama dengan besar torsi elektrik (T_e) sehingga tidak ada momen percepatan (*accelerating torque*). Dalam kondisi ini dapat dikatakan bahwa tidak terdapat percepatan maupun perlambatan pada rotor generator.

Namun, pada kondisi yang tidak stabil akibat gangguan dapat menyebabkan adanya perbedaan antara besar torsi mekanik dan torsi elektrik. Sehingga, dapat menyebabkan adanya percepatan ataupun perlambatan pada rotor generator. Hal ini sesuai dengan persamaan:

Jika gangguan tidak dihilangkan segera, maka percepatan atau perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem tenaga listrik tersebut. *Time frame* yang biasa digunakan pada studi kestabilan transien biasanya 3-5 detik dan 10-20 detik untuk sistem yang sangat besar. Berdasarkan referensi [7] perubahan sudut rotor terhadap waktu setelah terjadi gangguan berdasarkan kasus yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.6. pada gambar 2.6 menunjukkan kondisi generator saat stabil dan tidak stabil.



Gambar 2.6 Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien.

Gambar di atas menunjukkan kondisi stabil dan tidak stabil pada generator sinkron. Pada kondisi stabil yaitu kondisi 1, sudut rotor bertambah hingga maksimum, akan tetapi kemudian berkurang dan berosilasi hingga pada kondisi *steady-state*. Namun pada kondisi 2 (*frist swing instability*), sudut rotor terus bertambah sehingga generator kehilangan sinkronisasinya. Sedangkan pada kondisi 3 (*multi swing instability*), osilasi yang semakin bertambah mengakibatkan generator menjadi lepas sinkron.

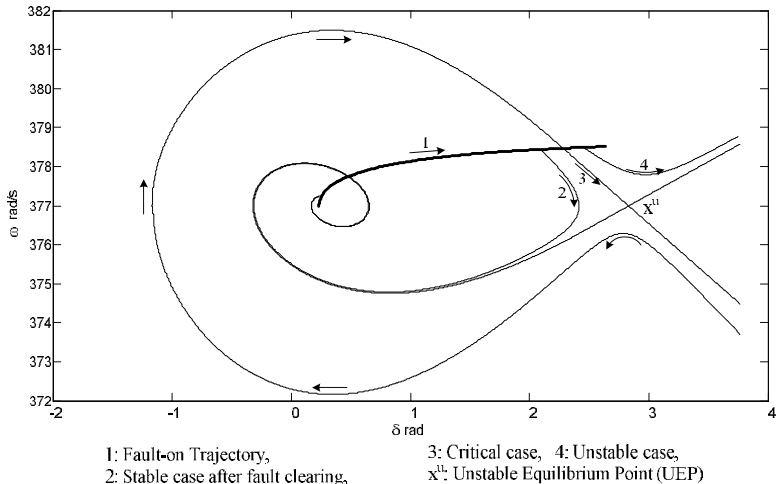
2.5 Waktu Pemutus Kritis (*Critical Clearing Time*)

Waktu pemutus kritis atau biasa disebut CCT (*Critical Clearing Time*) merupakan waktu maksimum pemutusan CB (*Circuit Breaker*) untuk mengisolasi gangguan agar sistem tetap stabil. Dalam hal ini generator yang diamati sebagai penentu suatu sistem stabil atau tidak saat terjadi gangguan. Oleh karena itu untuk melakukan setting waktu pemutusan CB tidak boleh melebihi CCTnya. Jika waktu pemutus CB melebihi CCTnya, maka sistem berada dalam keadaan tidak stabil dan generator akan kehilangan sinkronisasinya. Akibat yang paling parah akan menyebabkan sistem menjadi *blackout*.

2.6 Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Lintasan kritis merupakan suatu penggambaran dari respon generator pada saat gangguan diisolir dengan waktu pemutus kritis. Berdasarkan refrensi [1] lintasan kritis ini juga dapat didefinisikan

sebagai lintasan yang dimulai dari titik pada *fault-on trajectory* (lintasan dimana sistem mengalami gangguan) dan mencapai titik kritis (critical Point). Berdasarkan definisi tersebut lintasan kritis ditunjukkan seperti Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Lintasan dalam setiap tahap pada sistem tenaga listrik satu generator terhubung ke bus infinite dengan peredam

Empat jenis lintasan ditunjukkan dalam gambar 1, dimana lintasan “1” adalah lintasan saat terjadi gangguan (*fault-on trajectory*), lintasan “2” adalah saat dimana sistem sudah mencapai kestabilannya karena gangguan dihilangkan sebelum waktu pemutus kritisnya (CCT). Lintasan “3” adalah lintasan yang terbentuk ketika sistem dalam keadaan kritis. Di dalam metode ini, lintasan “3” disebut sebagai trajektori kritis (*critical trajectory*). Dalam kasus generator, lintasan kritis ini akan mencapai titik kesetimbangan tidak stabil (UEP) seperti yang terlihat pada Gambar 2. Sedangkan pada lintasan “4” adalah saat dimana sistem tidak menemukan kestabilan akibat sistem terlambat untuk mengisolasi gangguan.

BAB III

OPTIMAL POWER FLOW DENGAN BATASAN KESTABILAN TRANSIEN

3.1 Optimal Power Flow menggunakan MATPOWER

Pada tugas akhir ini, dalam menyelesaikan permasalahan OPF digunakan suatu tools atau program yang dikembangkan melalui software MATLAB yang disebut MATPOWER. Didalam toolbox MATPOWER telah tersedia pemodelan matematis untuk menyelesaikan permasalahan OPF tersebut. Dalam tugas akhir ini menggunakan persamaan AC OPF. Yang dimaksud dengan AC disini adalah memasukkan variable magnitude tegangan, sudut phasa tegangan, daya aktif generator dan daya reaktif generator. Dalam program MATPOWER keempat variable tersebut ditulis dalam satu matriks yang disebut matriks x

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_{g \text{ e } n} \\ Q_{g \text{ e } n} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Untuk meminimisasi total biaya pembangkitan dapat dutilaskan dengan rumus

$$\min_{\theta, V_m, P_{g \text{ e } n}, Q_{g \text{ e } n}} \sum_{i=1}^{N_{g \text{ e } n}} F_i(P_{g \text{ e } n}) + F_i(Q_{g \text{ e } n}) \quad (3.2)$$

Dimana,

i = indeks dari generator

N_{gen} = Jumlah generator

Selain mempunyai fungsi objektif yang harus dicapai dalam menyelesaikan optimasi aliran daya terdapat batasan – batasan yang harus terpenuhi. Batasan – batasan tersebut diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *equality constraints* dan *inequality constraints*. Pada generator memiliki *inequality constraints* sebagai berikut :

$$P_{g \text{ e } n}^{\min} \leq P_{g \text{ e } n} \leq P_{g \text{ e } n}^{\max} \text{ untuk } k = 1 \dots N_{g \text{ e } n} \quad (3.3)$$

$$Q_{gen}^{min} \leq Q_{gen} \leq Q_{gen}^{max} \quad n = 1 \dots N_{gen} \quad (3.4)$$

Hubungan antara pembangkitan, beban dan rugi – rugi daya memiliki persamaan yang disebut *power balance equality constraint*. Persamaan tersebut dinyatakan dalam perumusan berikut :

$$P_{total} - P_{distribusi} - \sum_{j=1}^{N_{gen}} P_{genj} = 0 \quad (3.5)$$

Persamaan aliran daya pada tiap bus :

$$P_{neti} + j Q_{neti} = V_i \left(\sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_k \right)^* \quad (3.6)$$

Dimana P_{neti} dan Q_{neti} adalah total daya aktif dan daya reaktif pada bus I, V_i adalah bentuk kompleks dari tegangan pada bus I dan Y_{ik} admitansi dari bus I ke bus k. untuk optimasi aliran daya dari daya aktif dan daya reaktif berdasarkan pembangkitan dan beban didapat perumusan :

$$(P_{gen} - P_{beban})_n + j (Q_{gen} - Q_{beban})_n = V_i \left(\sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_k \right)^* \quad (3.7)$$

Jika dipisahkan antara daya aktif dan daya reaktif untuk equality constraints pada tiap bus dapat ditulis sebagai berikut :

$$(P_{gen} - P_{beban})_n - Real_i \left(\sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_k \right)^* = 0 \quad (3.8)$$

$$(Q_{gen} - Q_{beban})_n - Imag_i \left(\sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_k \right)^* = 0 \quad (3.9)$$

3.2 Reduksi Matriks Jaringan

Setelah melakukan optimasi aliran daya pemodelan sistem jaringan sistem tenaga listrik direpresentasikan oleh matriks admitansi, dimana setiap nilai admitansi antara bus yang terhubung ditulis dalam bentuk matriks. Semakin banyak jumlah saluran dan jumlah busnya maka ukuran admitansi matrik juga akan semakin besar. Dengan ukuran matriks yang lebih besar akan membuat perhitungan dalam analisis kestabilan transien menjadi lebih lama dan kompleks. Untuk mengurangi kompleksitas tersebut maka perlu dilakukan reduksi (penyederhanaan) jaringan sehingga matriks admitansi jaringan menjadi lebih kecil. Dalam

melakukan analisis dan perhitungan matematis yang akan dilakukan menjadi lebih mudah dengan cara mereduksi bus beban dari matrik admitansi, sebab tidak ada arus yang masuk ataupun keluar sehingga bernilai nol. Untuk merepresentasikan matrik admitansi dari sistem dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & Y_{1(n+1)} & Y_{1(n+2)} & \cdots & Y_{1(n+n)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & Y_{2(n+1)} & Y_{2(n+2)} & \cdots & Y_{2(n+n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} & Y_{n(n+2)} & \cdots & Y_{n(n+n)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+n)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+n)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+n)n} & Y_{(n+n)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+n)(n+n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{n+m} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Agar lebih sederhana maka matrik di atas dapat ditulis sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Dimana n merepresentasikan bus beban sedangkan m merepresentasikan bus generator. Karena tidak ada arus yang mengalir pada bus beban, maka I_n bernilai nol, sehingga persamaan matrik menjadi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (3.13)$$

$$V_n = - \left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n} \right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (3.14)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (3.15)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.14) kedalam persamaan (3.15) maka akan didapatkan persamaan:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.16)$$

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.17)$$

Secara sederhana, persamaan tersebut dapat ditulis dengan persamaan:

$$I_m = Y_{red} E_{mi} \quad (3.18)$$

Dimana,

$$Y_{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm} \quad (3.19)$$

Dengan demikian sistem yang tadinya kompleks menjadi lebih sederhana. Sehingga, dapat mempermudah dalam perhitungan dan analisis kestabilan transien.

3.3 Pemodelan sistem

3.3.1 Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Persamaan ayunan merupakan pemodelan secara matematis yang merepresentasikan gerak suatu mesin serempak didasarkan prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa percepatan pada momen putar (accelerating torque) merupakan hasil kali kelembaman (moment inertia) rotor dan percepatan sudutnya. Berdasarkan refrensi [1] Persamaan ayunan dapat ditulis secara jelas dan lengkap dengan tahapan sebagai berikut :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.20)$$

Persamaan ayunan mengatur pergerakan dari rotor generator berkaitan dengan torsi inersia untuk resultan dari torsi mekanik dan torsi elektrik.

$$J \ddot{\theta} = T_a \quad (3.21)$$

Dimana :

- J = momen inersia untuk semua bagian yang berputar pada shaft
- θ = sudut mekanis pada shaft dalam radian
- T_a = torsi percepatan dalam N-m

Pada mesin sinkron, penggerak utama menggunakan torsi mekanik T_m pada shaftnya dan akan menghasilkan torsi elektromagnetis T_e , jika

$$T_a = T_m - T_e \quad (3.22)$$

Dimana :

T_m = Torsi mekanik dalam $N.m$

T_e = Torsi elektrik dalam $N.m$

Inersia gabungan generator dan penggerak utama dipercepat oleh ketidakseimbangan torsi, sehingga persamaan (3.22) menjadi

$$J \ddot{\theta}_m = J \dot{\omega}_m = T_a = T_m - T_e \quad (3.23)$$

Dimana,

ω_m =kecepatan sudut rotor dalam *r a d i a n / s e c o n d*

Persamaan diatas dapat dinormalisasikan ke dalam konstanta inersia per unit H yang didefinisikan sebagai energi kinetik dalam satuan watt-second. ω_{0m} sebagai kecepatan sudut pada kondisi sinkron dalam mekanikal radian per detik, konstanta inersia yaitu:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{0m}^2}{V A_{ase}} \quad (3.24)$$

Dari persamaan konstanta inersia H di atas, didapatkan momen inersia J yaitu:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} V A_{ase} \quad (3.25)$$

Persamaan (3.25) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.23), menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} V A_{ase} \dot{\omega}_m = T_a = T_m - T_e \quad (3.26)$$

Atau

$$2H \frac{\dot{\omega}_m}{\omega_{0m}} = \frac{T_m - T_e}{V A_{ase} / \omega_{0m}} \quad (3.27)$$

Dimana $T_{base} = V A_{ase} / \omega_{0m}$, persamaan di atas diubah menjadi bentuk per unit, sehingga

$$2H \frac{\dot{\omega}_m}{\omega_0 m} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (3.28)$$

Atau

$$\frac{2H}{\omega_0 m} \ddot{\delta} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (3.29)$$

Persamaan 2.7 merupakan persamaan yang menunjukkan persamaan ayunan single machine atau persamaan gerakan pada mesin sinkron. Nilai daya mekanis P_m dan daya elektris P_e hampir sama dengan nilai torsi mekanis T_m dan torsi elektris T_e .

3.3.2 Multi mesin tanpa bus *infinite*

Multi mesin pada sistem tenaga tanpa infinit bus didefinisikan menggunakan Xd' model generator, dimana tiap generator direpresentasikan dengan persamaan differensial dua dimensi. Pada sistem multi mesin perlu ditentukan suatu titik atau nilai yang terpusat dimana dapat merepresentasikan sistem multi mesin tersebut. Dalam hal ini dikenal istilah center of angle (COA) dan center of inertia (COI) dimana dari masing – mesin sinkron pada sistem mempunyai sudut dan momen inersia yang berbeda. Dalam hal ini sudut dinotasikan sebagai δ_0 dan menyatakan dari berat inersia rata – rata untuk semua sudut rotor. Perumusan dari center of angle adalah :

$$M_T \delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.30)$$

Dimana nilai M_t didapat dari

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.31)$$

Kita dapat memperoleh turunannya sebagai berikut

$$M_T \dot{\delta}_0 = \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i \quad (3.32)$$

Secara definisi dari persamaan (3,32) tentang COI, dapat ditentukan dari penurunan sebagai berikut.

Berdasarkan [1] mendefinisikan bahwa sudut baru dan kecepatan relatif sebagai berikut :

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \quad (3.33)$$

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 \quad (3.34)$$

Persamaan dari pergerakan COI dan COA pada sistem dapat ditentukan berdasarkan,

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{m_i} - P_e(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} \quad (3.35)$$

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{m_i} - P_e(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (3.36)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \quad (3.37)$$

Dimana:

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.38)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \quad (3.39)$$

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.40)$$

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \quad (3.41)$$

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 \quad (3.42)$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{m_i} - P_e(\theta)) \quad (3.43)$$

$$P_e(\theta) = \sum_{i=1}^n Y_i E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_i - \beta_j) \quad (3.44)$$

Dimana :

- P_{mi} = daya input mekanis
- ω_i = kecepatan rotor
- δ_i, θ_i = diviasi sudut generator
- M_i = momen inersia
- E_i = tegangan rotor
- V_{refi} = tegangan terminal refrensi
- V_{ti} = tegangan terminal
- P_{mref} = daya mekanis refrensi
- P_{ei} = daya listrik

3.3.3 Pemodelan generator

Sistem dimodelkan seperti pada persamaan berikut,

$$M \omega = P_m - P_e \quad (3.45)$$

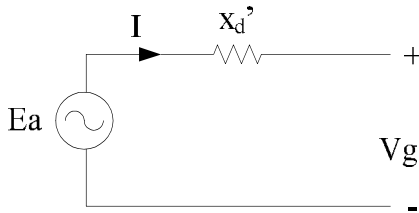
Dimana,

M : momen inersia

P_m : daya mekanis

P_e : daya elektrik

Untuk mendapatkan nilai P_m dapat dicari dengan memodelkan generator seperti gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3.1 Pemodelan Generator.

dari model diatas dapat ditulis dengan persamaan:

$$E_a = j X_d' I + V_g \quad (3.46)$$

Sedangkan daya mekanis dan daya elektrik dari generator dapat dicari dengan rumus:

$$P_m = E_a Y \quad (3.47)$$

$$P_e = \sum_{j=1}^m |E_i| |E_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j) \quad (3.48)$$

3.4 Perumusan Masalah

Perhitungan kestabilan transien dihitung dengan nilai awal (initial condition) ketika dalam kondisi stabil dan didefinisikan sebagai X_{pre} . ketika gangguan terjadi pada saat $t=0$ sistem diatur oleh persamaan dinamis seperti berikut :

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) \quad (3.49)$$

Dimana

$$x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N \quad (3.50)$$

Hasil dari persamaan () adalah lintasan kritis pada saat terjadi gangguan. Persamaan ini juga dapat ditulis sebagai berikut :

$$x(t) = x_F(t; x_p, r), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.51)$$

Dimana

$$x_F(t; x_p, r): R^N \rightarrow R^N \quad (3.52)$$

Hasil dari persamaan adalah lintasan kritis setelah gangguan. Persamaan () dapat ditulis sebagai berikut :

$$x(t) = x_F(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0: R^N \rightarrow R^N) \quad (3.53)$$

Sebagai catatan x^0 adalah titik pada lintasan kritis ketika gangguan saat $t = \tau$.

3.4.1 Metode Runge-Kutta Orde 4

Metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial dimana variable yang dihitung memerlukan langkah integrasi dari persamaan diferensial tersebut. Dan tidak seperti deret Taylor, metode ini tidak memerlukan evaluasi secara eksplisit dari turunan orde yang lebih tinggi. Rumus umum dari metode Runge-Kutta orde 4 untuk mendapatkan nilai suatu variable untuk langkah $(n+1)^{st}$ adalah,

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.54)$$

Dimana

$$k_1 = f(x_n, t_n)\Delta t \quad (3.55)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (3.56)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (3.57)$$

$$k_4 = f(x_n + k_2, t_n + \Delta t)\Delta t \quad (3.58)$$

Interpretasi dari solusi persamaan diatas adalah,

K1 = (slope pada awal step waktu) Δt

K2 = (perkiraan pertama menuju slope pada pertengahan step) Δt

K3 = (perkiraan kedua menuju slope pada pertengahan step) Δt

K4 = (slope pada akhir step) Δt

$$\Delta x = 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

3.4.2 Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Dalam mencari solusi dari persamaan (3.53) pada saat t_k dapat ditulis sebagai x^k , persamaan tersebut menggunakan rumus trapezoidal konvensional

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(x^{k+1} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.59)$$

Dimana

$$x^k = f(x^k) \quad (3.60)$$

Superscript k digunakan untuk menunjukkan keadaan waktu transisi. Gangguan pada sistem diisolir / dihilangkan pada waktu kritisnya (CCT) dan kondisi dari variabel – variabel konvergen pada titik kritis. Pada permasalahan tertentu titik kritis didapatkan dari titik ketidakseimbangan atau unstable equilibrium point (UEP) dan lintasan kritis mencapai titik tersebut pada waktu yang tak terbatas. Gambar 3.2 menunjukkan lintasan kritis dimana dua titik batasan, x_0 dan x_u yang merepresentasikan titik awal (initial point) pada CCT dan titik kritisnya. Dalam hal ini untuk mencapai titik UEP sangat sulit karena membutuhkan waktu yang tak berhingga. Hal ini dapat dianalogikan seperti sebuah bola yang bergerak naik menuju suatu titik puncak (UEP), ketika energy kinetic bernilai sama dengan energy potensial saat UEP, maka bola tersebut tidak dapat sampai pada titik tersebut (UEP) dengan waktu yang berhingga karena kecepatan bola menuju nilai nol saat bola tersebut sangat dekat dengan titik UEP. Akan tetapi untuk perhitungan dibutuhkan waktu yang terbatas. Untuk menghindari permasalahan tersebut metode baru untuk integrasi numeric telah ditemukan, seperti perumusan berikut :

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|x^{k+1} + x^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (3.61)$$

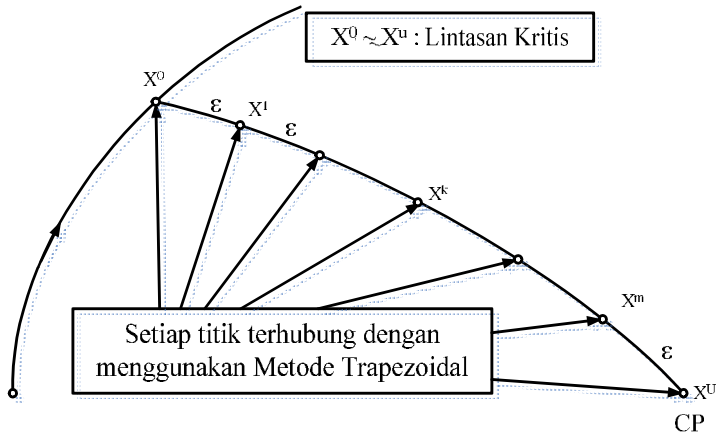
Sehingga durasi waktu diganti dengan domain jarak sebagai berikut:

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon \quad (3.62)$$

Persamaan (3.62) disubstitusikan kedalam persamaan (3.59) sehingga didapat :

$$x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} - x^k}{|x^{k+1} - x^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.63)$$

Dengan persamaan diatas, integrasi numeric terhadap waktu dirubah kedalam domain jarak. Perubahan tersebut memungkinkan representasi dari lintasan kritis dilakukan dengan waktu yang berhingga dengan jarak yang sama seperti Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Konsep dari modifikasi metode trapezoidal

3.5 Kondisi hilangnya sinkronisasi

Pada single single machine keadaan hilangnya sinkronisasi ketika $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$, dimana T dan P merupakan torsi sinkron dan daya, dan θ adalah sudut rotor. Pada sistem multi mesin kondisi hilangnya sinkronisasi dapat ditulis seperti berikut :

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \text{ dengan } |v| \neq 0 \quad (3.64)$$

Dimana $v \in \mathbb{R}^{N_{Gen}}$ adalah eigenvector yang merupakan zero eigenvalue dari matriks $[\partial P / \partial \theta] \in \mathbb{R}^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$, dan N_{Gen} adalah jumlah

generator. Dapat diasumsikan bahwa eigenvector harus memenuhi perubahan dari θ . Berikut ini adalah persamaan yang digunakan dengan scalar $k_s \in \mathbb{R}$:

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.65)$$

Sehingga dapat diasumsikan bahwa persamaan (3.64) dan (3.65) merupakan end point dari lintasan kritis. Semua variable tersebut akan diiterasi sebagai variable yang dipilih pada sub bab minimisasi permasalahan.

Walaupun hal tersebut bukan bukti lengkap dari kondisi stabilitas sistem dinamik, persamaan yang merepresentasikan kondisi stasioner dari torsi sinkron atau daya adalah sebagai berikut,

$$\dot{P} = 0 \quad (3.66)$$

Secara dasar P merupakan fungsi dari sudut rotor generator dengan persamaan,

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.67)$$

Persamaan (3.67) menunjukkan bahwa persamaan (3.65) dan (3.66) adalah setara satu sama lain dalam kondisi (3.64). Karena kondisi yang diusulkan merupakan gambaran dari kondisi stasioner dari T atau P dikarenakan kekhususan dari matriks torsi sinkron/ daya.

3.6 Boundary Condition

Pada gambar 3. Boundary condition adalah kondisi titik awal, x^0 dan kondisi titik akhir x^u . kondisi titik akhir merupakan pada saat hilangnya sinkronisasi yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Untuk initial point dapat dijelaskan sebagai berikut

$$x^0 = X_F(C \ C \ T_{p \ r \ l}) \quad (3.68)$$

3.7 Minimisasi Masalah

Berdasarkan gambar persamaan simultan dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 - X_F(C, C, T, x_{pr}, \tau) \\ k \text{ o n d i s i t i n i t i a l } \end{cases} \quad (3.69)$$

Dimana variabel - variabel ditentukan sebagai berikut:

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau) \quad (3.70)$$

Persamaan diataslah yang menjadi inti dasar awalan untuk metode *critical trajectory* yang digunakan. Selanjutnya metode *least square minimization* diselesaikan menggunakan metode Newton Raphson. Dimana metode Newton Raphson membutuhkan masukan dari hasil perhitungan matriks Jacobian. Dan matriks Jacobian menggunakan metode *weighting matrix* untuk memastikan generator kritis agar masuk dalam perhitungan matriks Jacobian.

Untuk menentukan kondisi kritis dalam kestabilan transien dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k, s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m \mu^{(k)} (\mu^{(k)})' + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.71)$$

Dimana $x^k \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.72)$$

$$x^k = f(x^k) \quad (3.73)$$

Dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (3.74)$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial \mu^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \theta \right] \quad (3.75)$$

Dimana W adalah matriks pembobot dengan diagonal matriks yang bernilai positif. Karena pemilihan W tidak mempengaruhi konvergensi atau akurasi metode yang diusulkan, maka matriks identitas akan digunakan untuk W simulasi. Setelah melakukan minimalisasi pada persamaan (3.71), μ^k akan menjadi bernilai nol dengan persamaan *trapezoidal* akan menghubungkan ke semua titik x^k , $k=0$ hingga $m + 1$. Persamaan (3.74) adalah kondisi batasan untuk titik awal (*initial point*), persamaan tersebut menunjukkan *fault-on trajectory* sebagai fungsi dari waktu *clearing* gangguan (τ). Sementara itu persamaan (3.75) adalah kondisi batasan lain, dimana batasan tersebut mengabaikan *sub-vector* dari X^{m+1} .

Dalam metode ini, kesalahan numerik μ^k adalah hasil akumulasi seiring peningkatan k sehingga titik akhir pada umumnya memiliki kesalahan yang cukup besar. Di sisi lain, metode ini menentukan titik akhir tambahan seperti dalam persamaan (3.75). kemudian menyelesaikan persamaan yang tidak diperlukan sebagai minimisasi permasalahan sehingga error μ^k benar-benar didistribusikan. Solusi dari persamaan (3.71) - (3.75) ditafsirkan sebagai berikut. Penentuan x^k , $k = 0$ hingga $m + 1$ yang merepresentasikan lintasan kritis, dimana ε secara otomatis ditentukan ketika jumlah integrasi m telah ditentukan, CCT dan titik akhir masing-masing diperoleh sebagai τ dan x^{m+1}

3.8 Perhitungan Critical Clearing Time

Tahapan dalam perhitungan CCT pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Penentuan lintasan pada saat gangguan didapatkan melalui integrasi numeric menggunakan metode runge-kutta dan didapatkan nilai $x^0(\tau)$ sebagai nilai awal untuk batasan pada metode *trapezoidal*
2. Persamaan (3.35) dan (3.37) untuk mendapatkan persamaan (3.72).
3. Melakukan minimisasi masalah menggunakan persamaan (3.71) – (3.75) dan diselesaikan dengan metode *newton-rhaphson* dengan $\max |dx| < 0.01$ sebagai kriteria konvergensi untuk mendapatkan CCT.

Berikut ini adalah susunan dari jacobian matriks yang digunakan saat hilangnya sinkronisasi untuk kondisi titik akhirnya.

Persamaan 1 :

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - P_{e_i}^{m+1}(\theta) \quad (3.76)$$

Dari persamaan (3.84) dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=1}^{N \ G} [Y_j^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_i^{m+1}) \\ P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=1}^{N \ G} [Y_j^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\delta_i^{m+1} - \delta_j^{m+1}) + \cos(\theta_i^{m+1})] \\ &\quad [Y_j^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\delta_i^{m+1} - \delta_j^{m+1}) + \sin(\theta_i^{m+1})] \\ P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - G_{i_i}^{m+1} (E_i^{m+1})^2 \sum_{j=1}^{N \ G} \sum_{j \neq i} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{i_j}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}) + \\ &\quad B_{i_j}^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}))] \end{aligned} \quad (3.77)$$

Sehingga komponen matriks Jacobian J_1 adalah :

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial q^{m+1}} & \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \\ \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial q^{m+1}} & \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^{m+1} \\ \vdots \\ \theta_j^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Persamaan 3.86 dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$J_1 = |D \ s \ \mu \times \dot{\theta} \quad (3.79)$$

Sehingga penurunannya menjadi,

$$\begin{aligned} D \ s \ \mu_i^{m+1} &= \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial q^{m+1}} \\ D \ s \ \mu_j^{m+1} &= \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial q^{m+1}} \end{aligned} \quad (3.80)$$

$D \ s \ \mu$ (turunan dari Dsa) dinamakan Dpa dan dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} D \ p \ \mu_i^{m+1} &= \frac{D \ s \ \mu_i}{\partial q^{m+1}} \\ D \ p \ \mu_j^{m+1} &= \frac{D \ s \ \mu_j}{\partial q^{m+1}} \end{aligned} \quad (3.81)$$

Sehingga persamaan (3.87) dan (3.88) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D \ s \ \mu_i^{m+1} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{N \ G} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{i_j}^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}) - B_{i_j}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}))]$$

$$D s \alpha_j^{m+1} = E_i^m + E_j^m + [G_{ij}^{m+1} \sin(\theta_{ij}^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_{ij}^{m+1})] \quad (3.82)$$

$$D p \alpha_i^{m+1} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \cos(\theta_{ij}^{m+1}) + B_{ij}^{m+1} \sin(\theta_{ij}^{m+1}))]$$

$$D p \alpha_j^{m+1} = [E_i^m + E_j^m + [G_{ij}^{m+1} \cos(\theta_j^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_j^{m+1})]] \quad (3.83)$$

Komponen J_l diturunkan terhadap θ dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{\partial I}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 P^{m+1}}{\partial q^2} \theta^{m+1} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \theta \quad (3.84)$$

Dari persamaan-persamaan di atas, dapat terbentuk matriks jacobian yang digunakan pada modifikasi *losing synchronism* sebagai titik akhirnya. Susunan matriks jacobian ditunjukkan pada gambar 3.3.

$$2 \times N O D \times N G \times (m+2) + 2$$

	$\overbrace{\omega_1^0 \dots \omega_N^{m+1}}^{NG \times (m+2)}$	$\overbrace{\theta_1^0 \dots \theta_N^{m+1}}^{NG \times (m+2)}$	$\overbrace{\varepsilon}^1$	$\overbrace{\tau}^1$
$\left\{ \begin{array}{l} NG \times m \\ \omega_1^0 \dots \omega_N^m \end{array} \right\}$	$A \tilde{\omega} \tilde{\omega}$	$A \tilde{\omega} \theta$	$A \tilde{\omega} \varepsilon$	$A \tilde{\omega} \tau$
$\left\{ \begin{array}{l} NG \times m \\ \theta_1^0 \dots \theta_N^m \end{array} \right\}$	$A \tilde{\omega}$	$A \theta \theta$	$A \theta \varepsilon$	$A \theta \tau$
$\left\{ \begin{array}{l} NG \\ \varepsilon \end{array} \right\}$	$A \varepsilon \tilde{\omega}$	$A \varepsilon \theta$	$A \varepsilon \varepsilon$	$A \varepsilon \tau$
$\left\{ \begin{array}{l} NG \\ \tau \end{array} \right\}$	$A \tau \tilde{\omega}$	$A \tau \theta$	$A \tau \varepsilon$	$A \tau \tau$

$$J_1 = |D s| \times \theta$$

Gambar 3.3 Susunan matriks Jacobian untuk perhitungan *CCT* berdasarkan hilangnya sinkronisasi

3.9 Batasan Kestabilan Transien dengan Sensitive Trajectory

Untuk menganalisa stabilitas transien dari sistem digunakan sudut rotor relatif. Sudut rotor akan dimonitoring setiap waktu dalam simulasi dinamis untuk melihat kontingensinya. Sensitivitas juga dihitung pada waktu yang sama. Meskipun perhitungan sensitivitas membutuhkan usaha komputasi yang luas, metode yang efisien untuk menghitung sensitivitas adalah dengan penggunaan efektif dari Jacobian yang umum untuk sistem dan persamaan sensitivitas. Hal ini dapat mengurangi proses komputasi. Ketika nilai $CCT < t_{cb}$ untuk kontingensi yang diberikan, sistem ini dianggap tidak stabil. Berdasarkan konsep awal dari sensitivitas trajectory sudut relatif yang diamati merupakan sudut relatif pada masing – masing generator terhadap perubahan waktu. Sistem dikatakan stabil jika $\delta_{ij} \leq 180^\circ$. Jika sudut generator melebihi 180° sistem dikatakan tidak stabil. Pada kondisi tersebut dilihat sudut relatif dari tiap generator. Sensitivitas sudut rotor pada kondisi tersebut akan digunakan untuk menentukan besarnya daya yang harus ditransfer dari generator kritis (*g e n e r a t o r*) ke generator yang tidak kritis (*g e n e r a t o r*) dengan menggunakan rumus:

$$\Delta P_{i,j} = \frac{\delta_{i,j} - \delta_{i,j}^0}{\frac{\partial \delta_{i,j}}{\partial P_i}} \bigg|_{m a x \delta = \pi} \quad (3.85)$$

Dengan metode yang diusulkan, sensitivitas yang digunakan merupakan lintasan kritis dari masing masing generator. Dimana dari lintasan kritis tersebut didapat sudut kritis dari masing – masing generator. Sudut kritis relatif dari masing – masing generator diamati dan yang memiliki sudut kritis relatif yang terbesar yang akan dilakukan transfer daya pada generator yang memiliki sudut kritis relatif yang terkecil. Untuk menentukan besar daya yang ditransfer dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta P_{i,j} = P_{i_{awal}} - P_i(\delta_k) \quad (3.86)$$

Dimana δ_k merupakan sudut kritis dari generator yang memiliki sudut relatif yang terbesar dan didapat dari hasil perhitungan CCT yang menghasilkan lintasan kritis..

Batasan yang harus dipenuhi agar biaya pembangkitan bisa minimum adalah sebagai berikut :

$$P_i^{n\ e\ w} = P_i^0 - \Delta P_{i,j} \quad (3.87)$$

Untuk $P_i^{n\ e\ w} \geq P_i^{m\ i\ n}$ maka dipilih $P_i^{m\ a\ x} = P_i^{n\ e\ w}$

Untuk $P_i^{n\ e\ w} < P_i^{m\ i\ n}$ maka dipilih $P_i^{m\ a\ x} = P_i^{m\ i\ n}$

$$P_j^{n\ e\ w} = P_j^0 + \Delta P_{i,j} \quad (3.88)$$

Untuk $P_j^{n\ e\ w} \leq P_j^{m\ i\ n}$ maka dipilih $P_j^{m\ i\ n} = P_j^{n\ e\ w}$

Untuk $P_j^{n\ e\ w} > P_j^{m\ i\ n}$ maka dipilih $P_j^{m\ i\ n} = P_j^{m\ a\ x}$

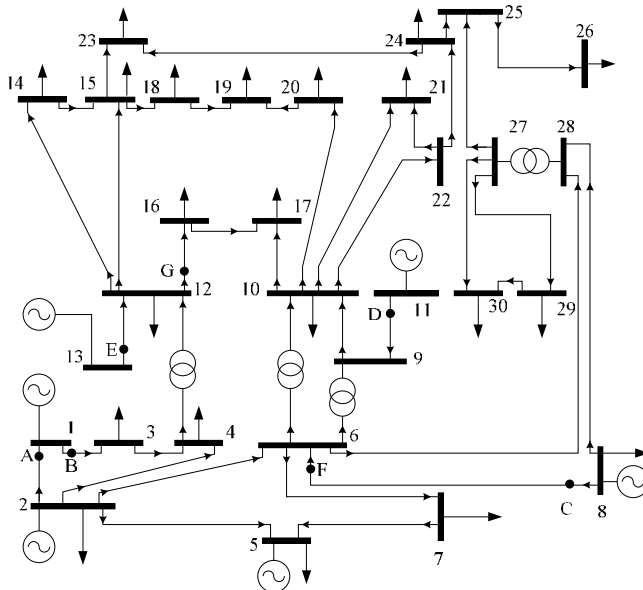
Dimana P_i^0, P_j^0 dan $\delta_{i,j}^0$ adalah pembebanan generator dan sudut rotor rotor yang dihasilkan dari proses OPF.

BAB IV SIMULASI DAN ANALISA

Simulasi dari metode yang diajukan dilakukan pada sistem multimesin. Adapun sistem yang diuji adalah sistem IEEE 6 generator 30 bus. Pada sistem ini dilakukan optimasi aliran daya dengan batasan kestabilan transien. Untuk mengamati kestabilan transien, sistem diuji dengan memberikan beberapa titik gangguan pada saluran. Gangguan yang diberikan merupakan gangguan simetri tiga fasa. Karena gangguan tersebut merupakan gangguan yang terbesar. Diharapkan sistem tersebut mampu bertahan untuk menjaga kestabilan transien. Pada simulasi yang dilakukan terbatas dengan penggunaan beban statis.

4.1 Analisa Optimasi Aliran Daya dengan batasan Stabilitas Transien pada Sistem 6 Generator 30-Bus

Sistem 6 generator 30 bus dapat dilihat seperti pada single line diagram dibawah ini,



Gambar 4.1 Single line diagram sistem IEEE 6 generator 30 bus

Sistem tersebut memiliki data sistem yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3

Tabel 4.1 Data Saluran Transmisi Sistem 6 Generator 30 Bus

No.	Dari Bus	Ke Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045
8	5	7	0,0460	0,1160	0,0
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0
10	6	8	0,0120	0,0420	0,0
11	6	9	0,0	0,2080	0,0
12	6	10	0,0	0,5560	0,0
13	9	11	0,0	0,2080	0,0
14	4	12	0,0	0,2560	0,0
15	12	13	0,0	0,1400	0,0
16	12	14	0,1231	0,2559	0,0
17	12	15	0,0662	0,1304	0,0
18	12	16	0,0945	0,1987	0,0
19	14	15	0,2210	0,1997	0,0
20	16	17	0,0824	0,1932	0,0
21	15	18	0,1070	0,2185	0,0
22	18	19	0,0639	0,1292	0,0
23	19	20	0,0340	0,0680	0,0
24	10	20	0,0936	0,2090	0,0
25	10	17	0,0324	0,0845	0,0
26	10	21	0,0348	0,0749	0,0
27	10	22	0,0727	0,1499	0,0
28	21	22	0,0116	0,0236	0,0
29	15	23	0,1000	0,2020	0,0
30	22	24	0,1150	0,1790	0,0
31	23	24	0,1320	0,2700	0,0
32	24	25	0,1885	0,3292	0,0

Tabel 4.1 Data Saluran Transmisi Sistem 6 Generator 30 Bus (lanjutan)

No.	Dari Bus	Ke Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
33	25	26	0,2254	0,3800	0,0
34	25	27	0,1093	0,2087	0,0
35	27	28	0,0	0,3960	0,0
36	27	29	0,2198	0,4153	0,0
37	27	30	0,3202	0,6027	0,0
38	29	30	0,2399	0,4533	0,0
39	8	28	0,0636	0,2000	0,0428
40	6	28	0,0169	0,0599	0,0130
41	9	10	0,0	0,1100	0,0

Tabel 4.2 Data Bus Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	0	0	0,0	0,0	-
2	50	0	21,7	12,7	-
3	0	0	2,4	1,2	-
4	0	0	7,6	1,6	-
5	105	0	94,2	19,0	-
6	0	0	0,0	0,0	-
7	0	0	22,8	10,9	-
8	50	0	30,0	30,0	-
9	0	0	0,0	0,0	-
10	0	0	5,8	2,0	0,19
11	20	0	0,0	0,0	-
12	0	0	11,2	7,5	-
13	20	0	0,0	0,0	-
14	0	0	6,2	1,2	-
15	0	0	8,2	2,5	-
16	0	0	3,5	1,8	-
17	0	0	9,0	5,8	-
18	0	0	3,2	0,9	-
19	0	0	9,5	3,4	-
20	0	0	2,2	0,7	-

Tabel 4.2 Data Bus Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus (lanjutan)

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
21	0	0	17,5	11,2	-
22	0	0	0,0	0,0	-
23	0	0	3,2	1,6	-
24	0	0	8,7	6,7	0,043
25	0	0	0,0	0,0	-
26	0	0	3,5	2,3	-
27	0	0	0,0	0,0	-
28	0	0	0,0	0,0	-
29	0	0	2,4	0,9	-
30	0	0	10,6	1,9	-

Tabel 4.3 Data Generator Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus

No. Generator	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Fungsi Biaya Pembangkitan (\$/h)
1	80	0	$0,00375 P^2 + 2,0 P$
2	80	0	$0,01750 P^2 + 1,75 P$
3	50	0	$0,06250 P^2 + 1,0 P$
4	55	0	$0,00834 P^2 + 3,25 P$
5	30	0	$0,02500 P^2 + 3,0 P$
6	40	0	$0,02500 P^2 + 3,0 P$

4.1.1 Parameter OPF untuk sistem 6 Generator 30 Bus

Berdasarkan parameter – parameter yang telah diketahui seperti pada tabel 4.1, tabel 4.2 dan tabel 4.3 dilakukan optimasi aliran daya menggunakan MATPOWER. Hasil optimasi dari MATPOWER akan didapatkan nilai – nilai parameter yang baru yang digunakan sebagai kondisi awal untuk dilakukan analisa kestabilan transien. Parameter – parameter yang didapat ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Parameter Pembangkitan Generator hasil OPF untuk sistem 6 Generator 30 Bus

No. Generator	Optimal Pembebanan Generator (MVA)	Total Biaya Pembangkitan (\$/h)
1	$80 - j8,14$	876,24
2	$79,29 + j23,05$	
3	$27,89 + 29,66$	
4	$55 + j48,68$	
5	$27,28 + j15,41$	
6	$26,33 + 21,64$	

Tabel 4.5 Nilai Tegangan tiap Bus pada sistem 6 Generator 30 Bus

No. Bus	Tegangan (p.u)	Sudut (derajat)
1	1,05	0,0
2	1,046	-1,566
3	1,035	-2,918
4	1,031	-3,475
5	1,022	-6,991
6	1,029	-3,981
7	1,018	-5,72
8	1,038	-3,676
9	1,020	-4,758
10	1,000	-6,867
11	1,050	-1,72
12	1,021	-6,144
13	1,049	-4,173
14	1,005	-7,11
15	0,999	-7,19
16	1,005	-6,738
17	0,996	-7,053
18	0,986	-7,83
19	0,983	-8,004
20	0,986	-7,781
21	0,983	-7,368
22	0,988	-7,358
23	0,985	-7,624
24	0,976	-7,832

Tabel 4.5 Nilai Tegangan tiap Bus pada sistem 6 Generator 30 Bus (lanjutan)

No. Bus	Tegangan (p.u)	Sudut (derajat)
25	0,982	-8,001
26	0,964	-8,454
27	0,995	-7,817
28	1,026	-4,28
29	0,975	-9,118
30	0,963	-10,054

4.1.2 Kestabilan Transien pada sistem 6 generator 30 bus menggunakan Critical Trajectory

Parameter – parameter yang didapat dari hasil simulasi OPF digunakan sebagai kondisi awal untuk dianalisa kestabilan transien sistem 6 generator 30 bus. Dalam melakukan analisa kestabilan transien sistem sistem diuji dengan beberapa titik gangguan yang telah ditentukan. Dari hasil simulasi akan didapat nilai CCT sistem, sudut rotor, dan kecepatan sudut rotor. Nilai CCT sistem dibandingkan dengan waktu pemutusan CB. Jika memenuhi $CCT \geq t_{cb}$ sistem dinyatakan stabil dan jika tidak terpenuhi sistem dinyatakan tidak stabil dan perlu dilakukan penjadwalan ulang untuk pembangkitan tiap generator. Untuk memastikan hal tersebut akan ditampilkan respon generator yang direpresentasikan oleh grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (detik), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (detik).

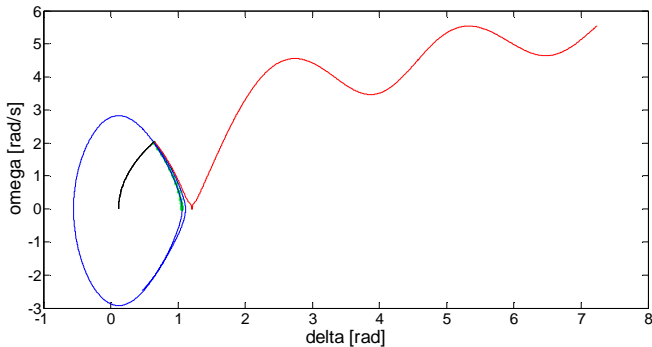
4.1.3 Simulasi dan Analisa Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus

Sebagai batasan pada OPF sistem IEEE 6 Generator 30 bus diuji pada beberapa titik gangguan di dekat dengan Generator. Karena semakin dekat titik gangguan dengan generator, akan sangat mempengaruhi kestabilan sistem dan nilai CCT yang didapat. Berikut ini adalah beberapa letak titik gangguan yang akan diuji :

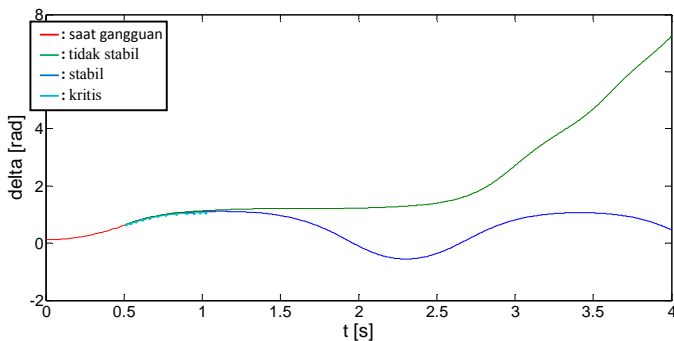
1. Kasus A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 2, dekat bus 1
2. Kasus B : titik gangguan antara bus 1 dan bus 3, dekat bus 1
3. Kasus C : titik gangguan antara bus 8 dan bus 6, dekat bus 8
4. Kasus D : titik gangguan antara bus 11 dan bus 9, dekat bus 11
5. Kasus E : titik gangguan antara bus 13 dan bus 12, dekat bus 13
6. Kasus F : titik gangguan antara bus 6 dan bus 8, dekat bus 6
7. Kasus G : titik gangguan antara bus 12 dan bus 6, dekat bus 12

a. Kasus A

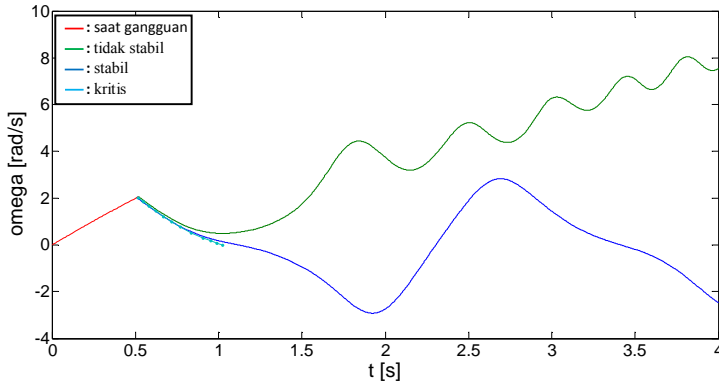
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0.5061 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator. Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 0.51 – 0.52 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (0.51 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (0.52 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.2 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.

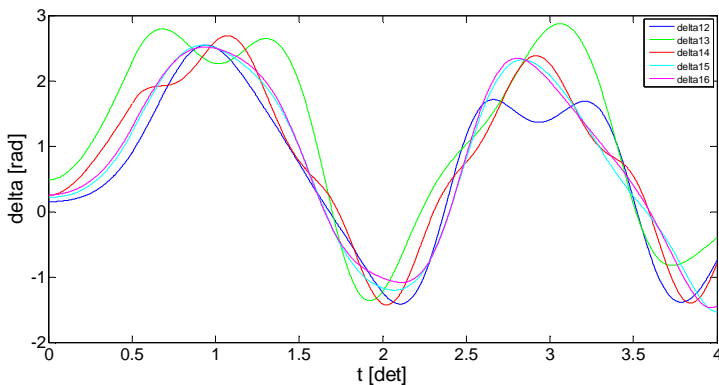


Gambar 4.3 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.



Gambar 4.4 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus A memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

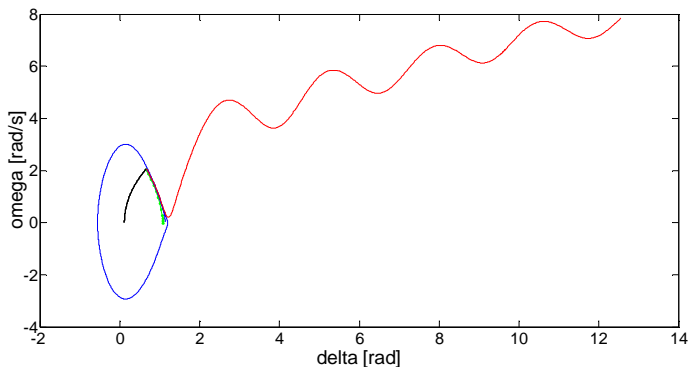


Gambar 4.5 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus A.

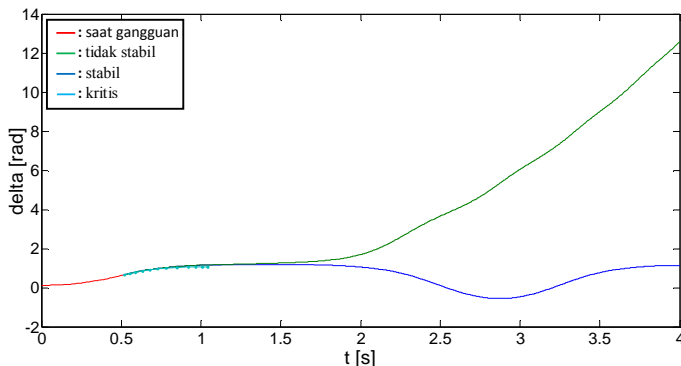
b. Kasus B

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0.5148 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik

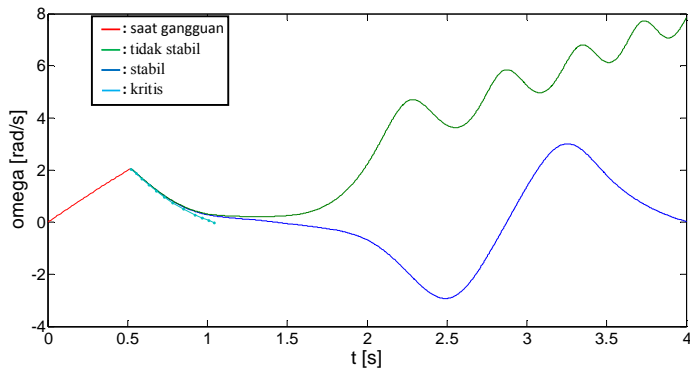
karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator. Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 0.521 – 0.522 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (0.521 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (0.522 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.6 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.

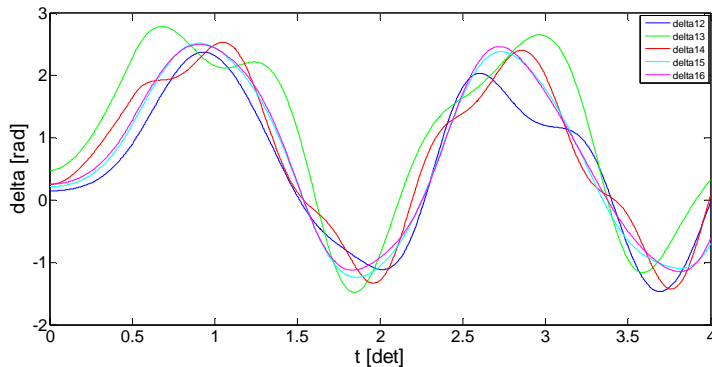


Gambar 4.7 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.



Gambar 4.8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus B memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

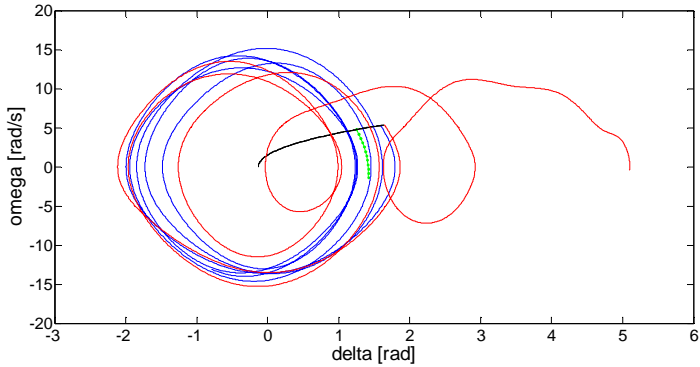


Gambar 4.9 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus B.

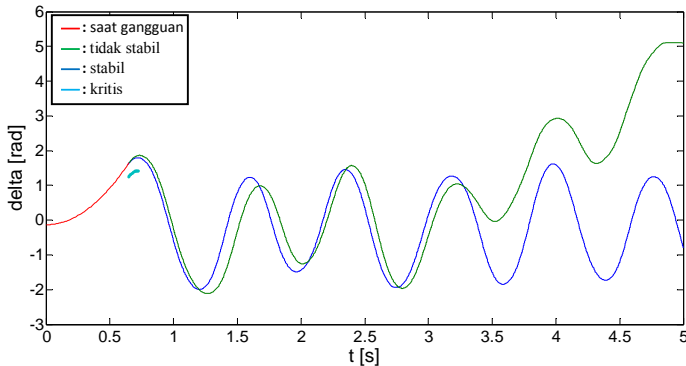
c. Kasus C

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0.5730 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva

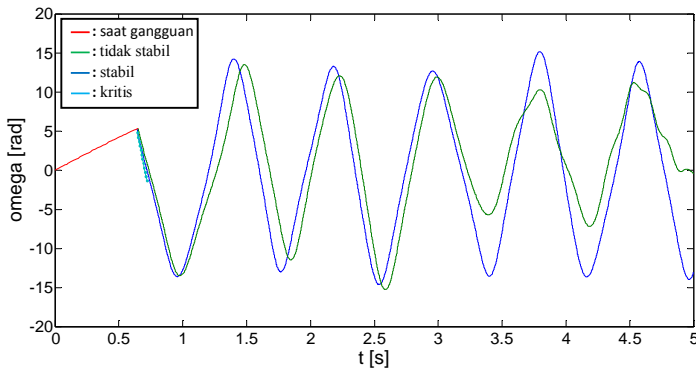
tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator. Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 0.64 – 0.65 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (0.64 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (0.65 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.10 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C.

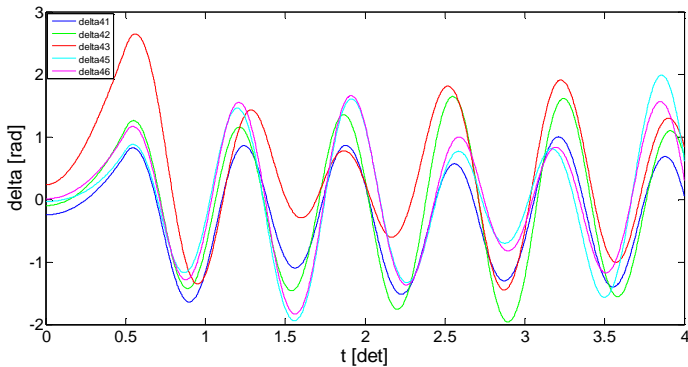


Gambar 4.11 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C.



Gambar 4.12 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus C memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

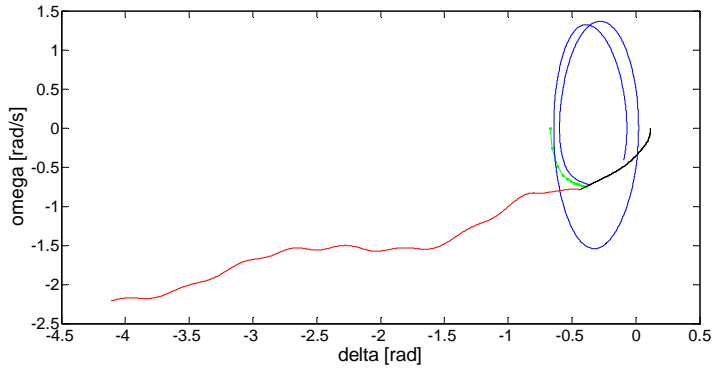


Gambar 4.13 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus C.

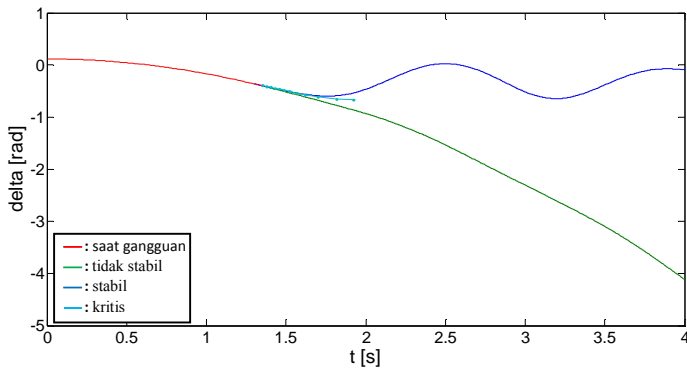
d. Kasus D

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1.3393 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator.

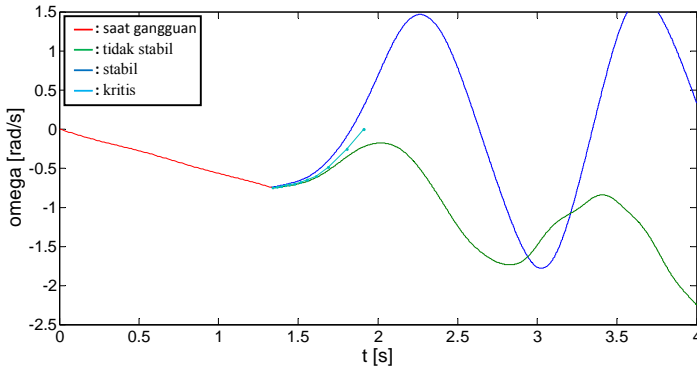
Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 1.33 – 1.34 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (1.33 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (1.34 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D.

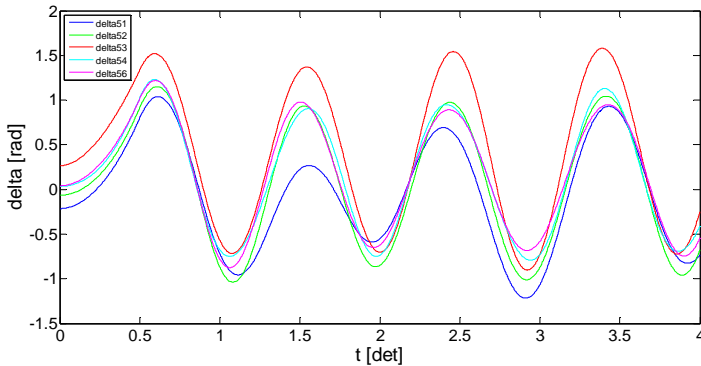


Gambar 4.15 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D.



Gambar 4.16 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus D memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

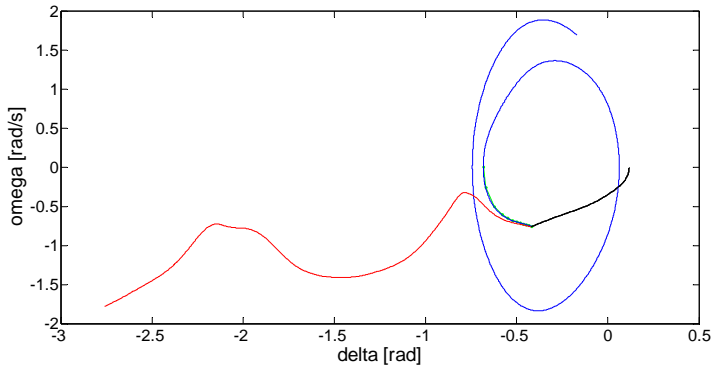


Gambar 4.17 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus D.

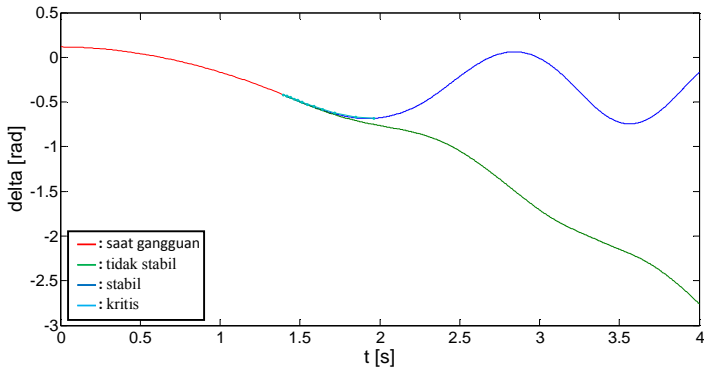
e. Kasus E

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1.3905 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator.

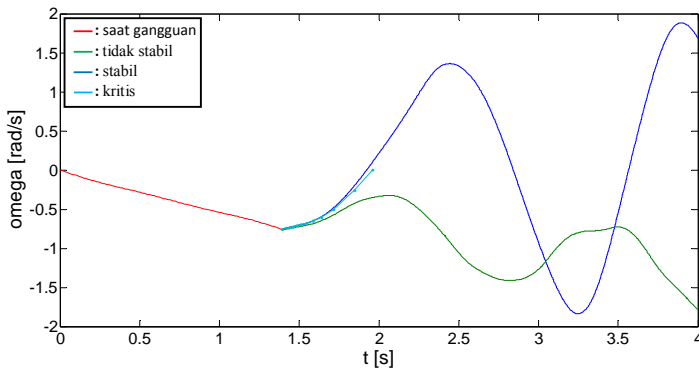
Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 1.39 – 1.40 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (1.39 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (1.40 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.18 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E.

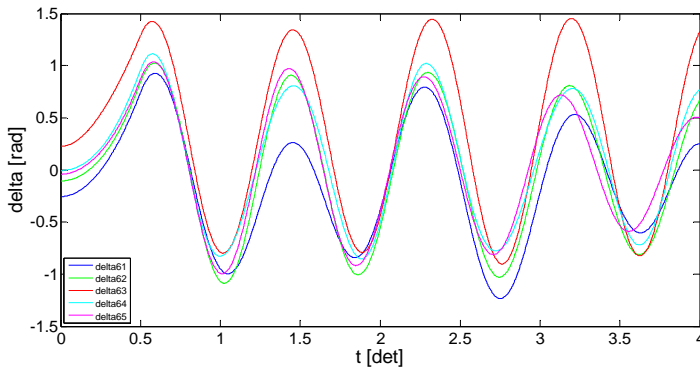


Gambar 4.19 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E.



Gambar 4.20 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus E memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

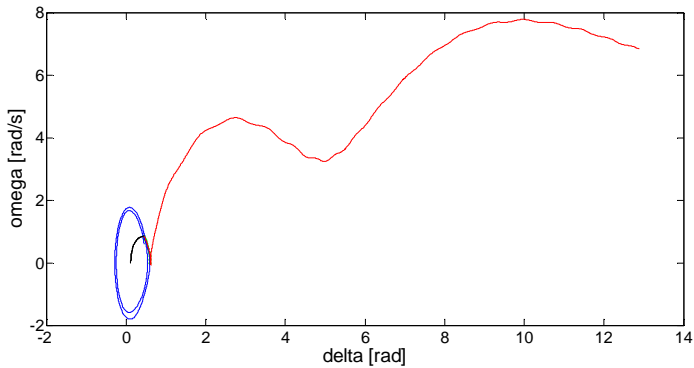


Gambar 4.21 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus E.

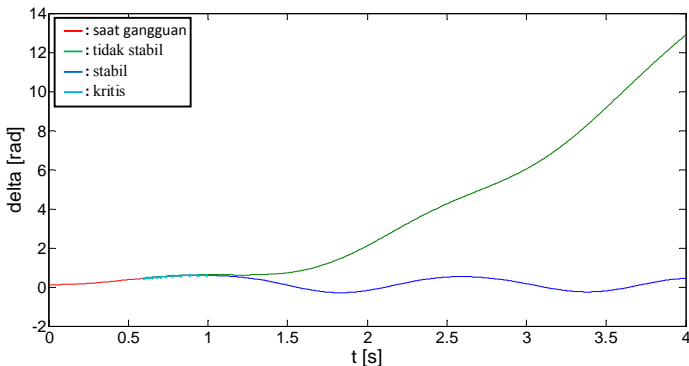
f. Kasus F

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0.5950 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva

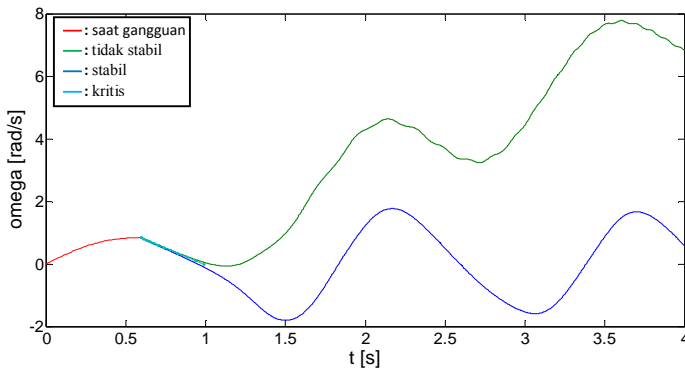
tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator. Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 0.59 – 0.60 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (0.59 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (0.60 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.22 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F.

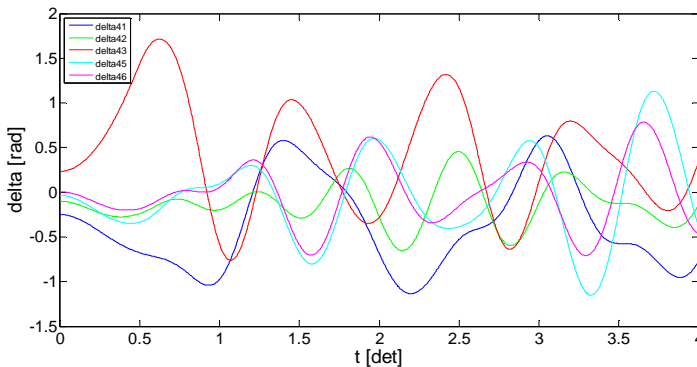


Gambar 4.23 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F.



Gambar 4.24 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus F memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).

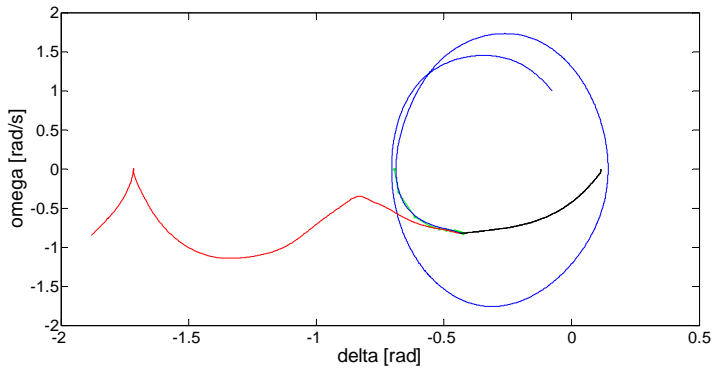


Gambar 4.25 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus F.

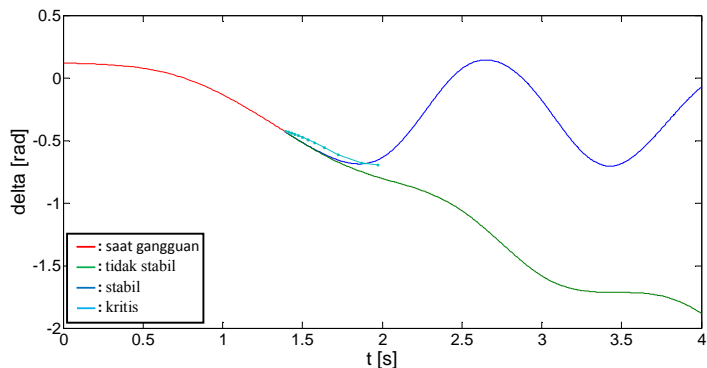
g. Kasus G

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1.3939 detik yang ditunjukkan pada kurva berwarna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Kurva

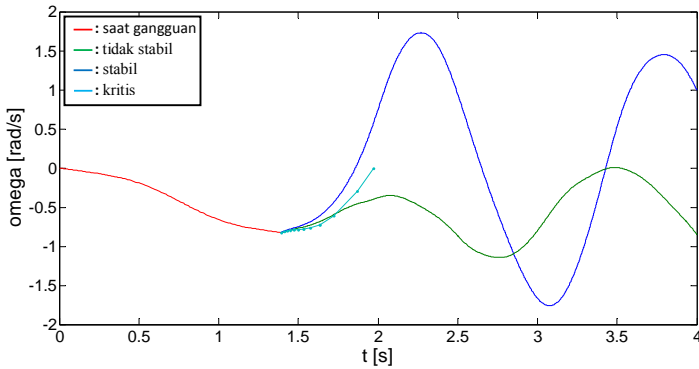
tersebut merepresentasikan lintasan kritis (critical trajectory) generator. Dengan menggunakan *numerical simulation method* didapat waktu pemutusan gangguan antara 1.39 – 1.40 detik. Nilai tersebut menunjukkan waktu dimana kondisi generator stabil (1.39 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik warna biru dan tidak stabil (1.40 detik), respon generator ditunjukkan pada grafik berwarna merah.



Gambar 4.26 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.

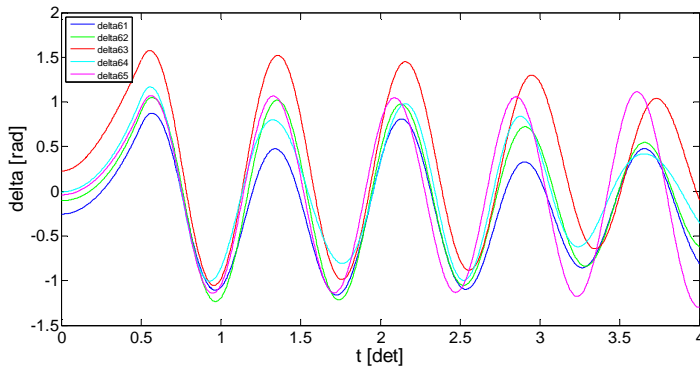


Gambar 4.27 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.



Gambar 4.28 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.

Berdasarkan nilai CCT yang didapat dari kasus G memenuhi syarat untuk batasan kestabilan transien $CCT \geq t_{cb}$. Untuk memastikan hal tersebut dapat ditunjukkan pada kurva sudut relatif generator dimana nilai sudut generator acuan terhadap generator lain tidak melebihi 180° ($\delta_{ij} < 180$).



Gambar 4.29 Grafik sudut rotor relatif terhadap waktu pada sistem 6 generator 30 bus saat gangguan terjadi pada kasus G.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Priyadi, N. Yorino, H. Kakui, and M. Takeshita, “*A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [2] N. Yorino, A. Priyadi, Y. Zoka, “*A Method for Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis,*” 2010 IREP Symposium- Bulk Power System Dynamics and Control – VIII (IREP), August 1-6, 2010, Buzios, RJ, Brazil
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Clasification of Power System Stability*” IEEE Transaction on Power System, Vol.19, No.2., May. 2004.
- [4] Grainger, John J., Stevenson, William D. “*Power System Analysis*”, New-York, McGraw-Hill. Inc, 1994
- [5] Yan Xu, Z. Yang Dong, Ke Meng, and J. Hua Zhao, “Hybrid Method for Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Computation” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 4, November 2012.
- [6] Wood, Allen J., Wollenberg, Bruce F., Sheble, Gerald B., “*Power Generation Operation and Control*”, Third edition, New-York, John Wiley & Sons. Inc, 2013.
- [7] Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [8] Saadat, Hadi., “*Power System Analysis*”, Second Edition McGrawHill, Inc, 2004.
- [9] Appendix –A, Data For IEEE-30 Bus Test System.
- [10] Reza, Mochammad., “*Studi Aliran Daya Optimum Mempertimbangkan Kestabilan Transien Sistem Menggunakan Simulasi Domain Waktu*”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kestabilan transien suatu sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh waktu pemutusan CB untuk mengisolir gangguan dari sistem
2. Dengan menggunakan metode yang diusulkan dapat dilakukan perhitungan secara langsung untuk mendapatkan nilai CCT, sehingga dapat dijadikan sebagai batasan kestabilan transien pada sistem 6 generator 30 bus.
3. Pada sistem IEEE 6 generator 30 bus dengan menggunakan metode yang diusulkan tidak perlu dilakukan penjadwalan ulang untuk pembangkitan masing – masing generator karena telah memenuhi batas kestabilan transien berdasarkan titik gangguan yang diujikan. Nilai CCT yang didapat dari beberapa titik gangguan yang diujikan didapat nilai CCT yang paling kecil pada titik gangguan A, yaitu 0.51 detik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan pengembangan untuk menentukan batas kestabilan sistem agar dapat melakukan perhitungan secara simultan dalam menentukan operasi yang optimum berdasarkan kestabilan transien.
2. Perlu dilakukan simulasi pada sistem multimesin yang lebih banyak untuk membuktikan keakuratan metode dalam memberikan penilaian terhadap kestabilan sistem multimesin yang *universal*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Yayang Sophiyan, dilahirkan di kota Jakarta pada 6 Januari 1990. Penulis Memulai jenjang pendidikan di SDN Pondok Kopi 04 Pagi, Jakarta Timur, SMPN 139 Jakarta Timur, SMAN 91 Jakarta Timur, dan menempuh pendidikan Diploma III di Politeknik Negeri Jakarta, Depok hingga lulus pada tahun 2011. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh

Nopember program Lintas Jalur dengan program studi teknik sistem tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email

yayang.sophiyan@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan